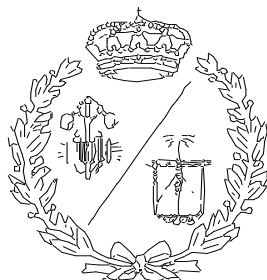


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO
NEWTONIANOS PARA PROTECCIONES
INDIVIDUALES.**

**(Use and application of non-Newtonian fluids
to individual protection)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Sergio Colinas Salamanca

Septiembre – 2021



AGRADECIMIENTOS.

Dedicado a los ojos que se incendian por aquello que los apasiona. Nunca perdáis ese brillo.

A mi familia, por prestarme su hombro sobre el que poder apoyarme.

A mi pareja, por compartir conmigo la vivencia.

A mis amigos y compañeros, por tenderme su mano.

A mi tutor, Severiano Pérez, y a Jorge Cueli, por sus consejos y experiencia.

Con toda el alma, gracias.



RESUMEN.

Las protecciones antibalas constituyen la principal defensa que tiene cualquier miembro de un cuerpo de seguridad ante una amenaza que implique armas de fuego. Sin embargo, el uso de estos equipos presenta un profundo desequilibrio. Existen numerosos casos de personas que han sufrido heridas graves, algunas llegando a fallecer, por un incorrecto uso de los mismos, incluso por la ausencia de estos.

El coste de los chalecos antibalas es muy diverso y depende de su nivel de protección. Esto provoca que el abastecimiento de dichos elementos no se realice de forma equitativa; motivo por el cual nació este proyecto.

El presente trabajo fin de grado tiene como objetivo analizar la viabilidad del uso de fluidos no newtonianos en armaduras contra armas de fuego. En él, se analizará la viscosidad y el concepto de dichos fluidos. De forma adicional, se recorrerá un estado del arte sobre los chalecos antibalas y las normativas utilizadas para categorizar a estos elementos.

Por otro lado, se expondrán dos investigaciones realizadas sobre fluidos no newtonianos y su comportamiento frente a impactos. Las conclusiones de sendos estudios se han utilizado para diseñar una solución que aporte respuestas a las preguntas sin resolver de las investigaciones mencionadas. En última instancia, se llevará a cabo un análisis presupuestario de la solución y una simulación de cómo podría comportarse la misma.



ABSTRACT.

Bulletproof protection make the main defense against a firearm for any security force member. However, the use of these equipment is deeply unbalanced. There are many cases in which people suffered grave wounds or death due to a wrong use, or even absence of these elements.

Bulletproof vest's cost has a wide ranging and it depends on its protection level. This causes a no equitable distribution of them, which is the first reason for the birth of this project.

This end-of-degree work has the goal of analysing the non-Newtonian fluid's viability in bulletproof vest against firearm. In this document, it will be analyzed the viscosity and the concept of these fluids. In additional way, it will be researched bulletproof vest's history and the normative that allow to categorise these protections.

On the other hand, it will be explained two investigations about non-Newtonian fluid's and its behavior against impacts. The conclusions have been used to design a solution to give answers to questions of these two studies. Finally, it will be done a solution's budget and a simulation that could approach how the very solution could behave.



RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4

ÍNDICE GENERAL:

1. MEMORIA.....	12
1.1. INTRODUCCIÓN.	12
1.2. ANTECEDENTES.	12
1.2.1. Recorrido histórico.	13
1.3. OBJETIVO Y MOTIVACIÓN.	18
1.4. ALCANCE.	18
1.5. PROTECCIONES CONVENCIONALES CONTRA ARMAS DE FUEGO.	19
1.5.1. Materiales.	20
1.5.2. Proceso de fabricación.....	21
1.5.3. Pruebas y ensayos.....	24
1.5.4. Resultados de los ensayos.	27
1.6. DISIPACIÓN ENERGÉTICA DE LOS PROYECTILES.....	30
1.6.1. Cálculo energético.	31
1.6.2. Cálculo de superficie.....	32
1.6.3. Cálculo tensional.....	34
1.7. PRINCIPIO DE PROTECCIONES VISCOSAS CONTRA ARMAS DE FUEGO. .	35
1.7.1. Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos.	36
1.7.2. Comportamiento lineal de la viscosidad.	41
1.7.3. Otras aplicaciones de fluidos no newtonianos.	42
1.8. INVESTIGACIONES PREVIAS.	46
1.8.1. Regímenes para un fluido en movimiento.	47
1.8.2. Estudio con impactos generados mediante energía potencial.	48
1.8.3. Estudio con impactos generados neumáticamente.	55
1.8.4. Conclusiones de las investigaciones y su desarrollo como protecciones antiimpactos.	61
1.9. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	64
1.9.1. Fluido propuesto para experimentación.	65
1.9.2. Contenedor que alberga al fluido.	65
1.9.3. Estructura soporte.....	67
1.9.4. Solución simulada.....	70
2. ANEXOS.....	76
2.1. CÁLCULOS.....	76
2.1.1. Tensión tangencial en la superficie de los diferentes proyectiles.....	76
2.1.2. Valores de viscosidad ante un comportamiento lineal.	83
2.1.3. Desarrollo de cálculos en la investigación con impactos generados mediante energía potencial.	86
2.1.4. Concepto de masa añadida en la investigación con impactos generados mediante energía potencial.	87
2.1.5. Uniones roscadas del armazón de la solución propuesta.....	88
2.1.6. Uniones roscadas de la estructura de la solución propuesta.....	89
2.1.7. Uniones soldadas de la solución propuesta.	91
2.1.8. Simulación de la solución propuesta.	94



3.	PLANOS.	100
4.	PLIEGO DE CONDICIONES.	101
4.1.	USO Y MANEJO DE ARMAS DE FUEGO.	101
4.2.	FABRICACIÓN DEL FLUIDO.	101
4.3.	FABRICACIÓN DEL ARMAZÓN.	102
4.4.	FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA.	102
5.	PRESUPUESTO.	103
5.1.	COSTE DE REALIZAR LA EXPERIMENTACIÓN PLANTEADA.	104
5.1.1.	Adquisición de materiales.	104
5.1.2.	Adquisición del equipo.	106
5.1.3.	Coste total de la solución.	107
6.	BIBLIOGRAFÍA.	108



ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Dibujo de un hoplita griego de finales del siglo V a.C. Puede apreciarse que la armadura cubría las partes vitales del cuerpo dejando al escudo la protección de las restantes partes del mismo. [15]	14
Figura 2. Fotografía de una recreación de una armadura medieval gótica hecha de placas metálicas. Puede verse debajo de la coraza la protección acolchada de color azul. [16]	14
Figura 3. Boceto de tres soldados ataviados con el uniforme reglamentario de los tercios españoles durante los siglos XVI y XVII. De izquierda a derecha: alabardero, arcabucero y lancero. [18]	15
Figura 4. Chaleco antibalas ligero de la Primera Guerra Mundial. [29]	16
Figura 5. Armadura completa utilizada por las tropas norteamericanas en Francia en 1917. [29].....	16
Figura 6. Armadura de vuelo M1 utilizada por los paracaidistas aliados durante el Desembarco de Normandía el 6 de junio de 1944. [31].....	17
Figura 7. Proceso de trenzado de fibras aramidadas. Apréciase el fuerte entrelazamiento que presentan. [9].....	22
Figura 8. Panel balístico. Se puede apreciar cada una de las láminas que lo conforman, así como la capa protectora que las envuelve. [10]	22
Figura 9. Protección antibala hecha mediante fibras trenzadas. Este tipo de chalecos suelen ser los más comunes entre cuerpos de seguridad. [11]	23
Figura 10. Chaleco antibalas de placas. Puede apreciarse que a primera vista presenta menos protección que el mostrado en la Figura 3. [12]	24
Figura 11. Ilustración esquemática de la penetración de un proyectil según el parámetro P-BFS. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13].....	26
Figura 12. Modelo del montaje con el que se realizan los disparos de los proyectiles. Puede observarse que las distancias están condicionadas por el calibre de los mismos. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13].....	27



- Figura 13.** Localización de las zonas de tolerancia donde se deben focalizar los impactos. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13]..... **28**
- Figura 14.** Proyectoil de 9x19 milímetros Luger. [25]..... **30**
- Figura 15.** Comparación de dos proyectiles FMJ (izquierda y derecha de la fotografía) con uno de punta hueca (centro de la imagen). Pueden apreciarse las marcas en la punta de la bala central que hacen que se expanda. [32] **31**
- Figura 16.** Ilustración que se seguirá para aproximar la geometría del proyectoil de 9 milímetros. **33**
- Figura 17.** Medidas de un proyectoil de 9 milímetros. Esta imagen es propiedad de: SAAMI. [26]..... **34**
- Figura 18.** Boceto del volumen que debería adaptar el fluido en la situación propuesta. Apréciese que la cara sombreada es aquel plano sobre el que incidiría el proyectoil..... **36**
- Figura 19.** Trayectoria descrita por un proyectoil (calibre 4,5 mm) de un arma de aire comprimido al impactar sobre una muestra de gel balístico. [33] **36**
- Figura 20.** Elemento diferencial de fluido sometido a esfuerzo cortante. Las líneas discontinuas representan la deformada que sufre..... **38**
- Figura 21.** Representación bocetada de la viscosidad. La línea 1 es indicativa de un fluido newtoniano. Sin embargo, las líneas 2 y 3 corresponden con uno no newtoniano. El número 2 se relaciona con un fluido dilatante; mientras que el tercero, con un pseudoplástico. **40**
- Figura 22.** Representación en boceto de la tensión tangencial. La línea 1 corresponde con un fluido newtoniano, mientras que las 2 y 3 con uno no newtoniano. La relación 2 ampara el comportamiento dilatante, pero el caso 3 el de un pseudoplástico. **40**
- Figura 23.** Lubricación de un engranaje de tornillo sin fin. Apréciese de la viscosidad del mismo. [21] **43**
- Figura 24.** Corriente de lava provocada por la erupción del volcán Fagradalsfjall cerca de la capital islandesa en marzo de 2021. [22] **44**
- Figura 25.** Badén Inteligente de Velocidad (BIV) frente al paso de un autobús urbano en Madrid. Esta imagen es propiedad de: Revista Tráfico y Seguridad Vial – DGT. [23]..... **45**



- Figura 26.** Serie de imágenes tomadas del modelo simulado que contrastan las diferencias entre un cuerpo sometido a una pendiente en un terreno seco y un terreno con una determinada humedad. [34] 46
- Figura 27.** Representación del movimiento de un fluido en régimen laminar por el interior de una tubería. Apréciase las capas concéntricas del fluido. [28] 47
- Figura 28.** Línea de corriente de una partícula fluida en régimen turbulento. Se aprecia que su movimiento es totalmente aleatorio. [28] 47
- Figura 29.** Esquema ilustrativo del experimento que se basa en la utilización de la energía potencial gravitatoria y la energía potencial elástica. [35]..... 49
- Figura 30.** Variación de aceleración, velocidad y penetración de la varilla a lo largo del proceso de impacto para una velocidad inicial de 1,18 ms. [35] 50
- Figura 31.** Relaciones graficas entre la aceleración de la varilla de aluminio con el tiempo y la fuerza que alcanza el fondo del depósito (línea roja discontinua). [35] 51
- Figura 32.** Representación de las diferentes zonas volumétricas del fluido. En rojo, la parte rígida (apréciase que tiene una geometría troncocónica); en amarillo, el fluido que permanece invariable; y en naranja, la zona intermedia entre las anteriores, la cual es la relacionada con el efecto de masa añadida. [35] 53
- Figura 33.** Representación de la información recopilada mediante velocimetría de imágenes de rayos X. Apréciase que las líneas negras se corresponden con los vectores de desplazamiento en dichos puntos. [35] 54
- Figura 34.** Comparación entre valores de aceleración, velocidad y desplazamiento de la varilla metálica medidos en la experimentación y calculados según un modelo matemático. [35]..... 55
- Figura 35.** Vistas esquemáticas superior y lateral de la configuración del experimento que hace uso de un cilindro neumático como generador de impactos. [36]..... 57
- Figura 36.** Gradiente de velocidades asociado a una gama cromática para observar la rigidización del material. Apréciase que el cambio del caso c.) al caso d.) es debido a que la rigidización ya ha alcanzado los límites de contorno del sistema. 58



Figura 37. Perfil de velocidades longitudinal para el instante 17,5 ms en el fluido no newtoniano con un pistón neumático como simulador de impactos. El valor de x_f se corresponde con el valor más alto de la pendiente.	59
Figura 38. Perfil de velocidades transversal para el instante de tiempo de 17,5 ms en el fluido después de generar un impacto con un vástago neumático. La línea discontinua de y_f marca el punto donde la pendiente es más grande.	59
Figura 39. Modelo propuesto para realizar la experimentación de penetración de un proyectil en un fluido no newtoniano.	64
Figura 40. Armazón de metacrilato atornillado para asegurar la fijación de las distintas placas y albergar el fluido dilatante.	67
Figura 41. Estructura metálica en la se sitúa el contenedor de metacrilato. Puede apreciarse que presenta unos orificios para poder atornillarla a una bancada. Estas uniones presentan un diámetro de 25 mm.	68
Figura 42. Resultado en tensiones de los dos primeros cubos elementales. Puede apreciarse la leyenda cromática a la derecha de la imagen.	73
Figura 43. Resultado en deformaciones de los tres primeros niveles y las deformaciones que sufre cada uno. Apréciase que la línea negra marca el volumen original de la simulación.	74
Figura 44. Imagen de los cinco cubos elementales deformados en conjunto. Puede verse que el primero de ellos es el que sufre los valores pico, mientras que el resto apenas los sufren.	75
Figura 45. Relaciones longitudinales y diametrales de una bala de 0,40 pulgadas S&W. Esta imagen procede de la normativa SAAMI. [26]	78
Figura 46. Geometría acotada de un proyectil de 0,357 pulgadas Magnum. Esta ilustración es propiedad de SAAMI. [26]	79
Figura 47. Vista acotada de una bala de 0,357 pulgadas de calibre. La propiedad de esta figura corresponde a SAAMI. [26]	80
Figura 48. Ilustración con las medidas que presenta el proyectil 0,44 Magnum. Esta imagen ha sido obtenida de SAAMI. [26]	81



- Figura 49.** Medidas que presenta la bala de 7,62 x 51 milímetros de la OTAN. La imagen mostrada pertenece a SAAMI. [27] 82
- Figura 50.** Gráfico que relaciona el desplazamiento de una partícula granular de la mezcla fluida en función de las fuerzas externas que generan este desplazamiento. Las figuras rojas corresponden con valores medidos y la línea azul con los obtenidos mediante modelos matemáticos. [35]..... 87
- Figura 51.** Estructura soporte en la que los cordones de soldadura están coloreados en azul. 92
- Figura 52.** Variación de la superficie libre del fluido a lo largo de una distancia radial y en función del tiempo. Los valores corresponden con una aceleración de 125 ms^2 y una velocidad de $1,18 \text{ ms}$ 95
- Figura 53.** Estructura elemental cúbica de la simulación. 97
- Figura 54.** Cubos elementales correspondientes a los tres primeros niveles de la simulación. Apréciense los esfuerzos coloreados en negro y los grados de libertad restringidos en rojo..... 99



1. MEMORIA.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Las protecciones antibalas constituyen la principal defensa que tiene cualquier miembro de un cuerpo de seguridad ante una amenaza que implique armas de fuego. Sin embargo, el uso de estos equipos presenta un profundo desequilibrio. Existen numerosos casos de personas que han sufrido heridas graves, algunas llegando a fallecer, por un incorrecto uso de los mismos, incluso por la ausencia de estos.

El coste de los chalecos antibalas es muy diverso y depende de su nivel de protección. Esto provoca que el abastecimiento de dichos elementos no se realice de forma equitativa; motivo por el cual nació este proyecto.

Los fluidos no newtonianos son un campo de investigación de la reología, es decir: “el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos” (Real Academia Española, RAE). Debido al complejo comportamiento de estos materiales, apenas existen fuentes bibliográficas sobre los mismos, por lo que a lo largo del estudio se asumen aproximaciones y simplificaciones que otorgan resultados lo más próximos a la realidad. En caso de contemplarse todo el campo de fenómenos físicos que intervienen en el problema, se requerirían instalaciones muy específicas y adaptadas para lograr medir cada uno de los parámetros.

1.2. ANTECEDENTES.

La historia del ser humano siempre ha estado caracterizada por la guerra y el conflicto entre grupos. Esta peculiaridad como especie ha generado que se hayan desarrollado diferentes herramientas con el paso del tiempo para cumplir con tales propósitos bélicos. Uno de estos instrumentos es el uso de armaduras para incrementar la defensa y la seguridad contra armas o cualquier tipo de peligro.

En este apartado se pretende llevar a cabo un estado del arte de las protecciones personales, concretamente para aquellas diseñadas contra armas de fuego.



1.2.1. Recorrido histórico.

La necesidad de la humanidad de protegerse frente a ataques físicos se ve reflejada en el primer uso de armaduras entre el primer y el segundo milenio antes de Cristo. Estas protecciones han ido variando a lo largo de los siglos en múltiples aspectos, pero su finalidad siempre ha permanecido constante: salvar vidas. Las primeras corazas de las que se tienen constancia se fabricaban con cuero o lino, aunque se tienen registros de que, en ocasiones, estos materiales se entrelazaban con placas metálicas para incrementar la defensa. [14]

Los avances futuros en tecnología permitieron el uso de elementos más resistentes y con mejores calidades: uso de seda trenzada, mejores aleaciones metálicas, geometrías desfavorecedoras a la penetración de impactos, entre otros. No obstante, la base física sobre la que se basaban ha llegado invariante hasta el siglo XXI, es decir, aprovechar la flexibilidad y la deformación de un cuerpo para reducir la energía inicial de un impacto, para luego evitar la perforación a través de un material más rígido.

Pensar en armaduras antiguas es, con bastante probabilidad, sinónimo de pensar en protecciones como las usadas por hoplitas griegos (*véase Figura 1*), legionarios romanos o caballeros medievales (*véase Figura 2*). Sin embargo, estos soldados se pertrechaban contra armas de la época como espadas, lanzas o flechas. Si bien es cierto que el uso de flechas equivale a un proyectil dirigido hacia un objetivo, no fue hasta la extensión de la ballesta por Europa cuando empezó a hacerse notoria la importancia de una coraza resistente a los virotes que estos instrumentos lanzaban y, con lo cual, la repercusión de las armas a distancia en los conflictos bélicos.



Figura 1. Dibujo de un hoplita griego de finales del siglo V a.C. Puede apreciarse que la armadura cubría las partes vitales del cuerpo dejando al escudo la protección de las restantes partes del mismo. [15]



Figura 2. Fotografía de una recreación de una armadura medieval gótica hecha de placas metálicas. Puede verse debajo de la coraza la protección acolchada de color azul. [16]

Dado que el presente estudio se centra en los equipos defensivos contra armas de fuego, se va a hacer especial mención a los orígenes de estos elementos. Para empezar, es imperativo



mentonar que la extensión de estas armas fue acelerada exponencialmente a raíz de la batalla de Ceriñola (28 de abril de 1503), la cual marcó un precedente al obtener la victoria por parte de las tropas españolas frente a las francesas, mucho más numerosas [17]. El resultado de la contienda fue definido en gran parte por el aprovechamiento del terreno y del uso de armas de fuego como el arcabuz (véase *Figura 3*). Durante los siglos venideros a este enfrentamiento, las protecciones se fueron centrando cada vez más en la defensa contra proyectiles, tanto de balas esféricas como de la fragmentación causada por la artillería. No obstante, la eficacia de estos elementos no se desarrollaba lo suficientemente rápido a como lo hacía el rendimiento de nuevos tipos de balas, como la invención de la bala cónica en 1832. En el mejor de los casos, el impacto no provocaba la muerte de un individuo, pero sí causaba importantes lesiones como fracturas o hemorragias.



Figura 3. Boceto de tres soldados ataviados con el uniforme reglamentario de los tercios españoles durante los siglos XVI y XVII. De izquierda a derecha: alabardero, arcabucero y lancero. [18]

Las guerras habidas durante los siglos XIX y XX (especialmente en este último siglo) y su masividad mundial provocaron que el uso de las protecciones quedara casi en exclusividad para la cabeza, mientras que el resto del cuerpo solamente estaba protegido por los correspondientes uniformes militares.

Por un lado, en la Primera Guerra Mundial (1914 - 1918) existían diferentes categorías para agrupar los equipos defensivos de los que disponían. Muy similar a cómo se realiza actualmente, se distinguían entre las diferentes clases mediante la rigidez de la propia defensa, pudiendo ser: totalmente rígidas (pesadas), intermedias o blandas (ligeras) [29]. La última de estas armaduras consistía en materiales capaces de coserse a los uniformes (como



la seda, el algodón o el lino) y que resultaran ligeros para poder llevarlos como una prenda más (véase *Figura 4*). Por el contrario, para las defensas más rígidas consistían desde placas metálicas o cerámicas entretejidas a la ropa hasta protecciones completas de sumo peso e incomodidad (véase *Figura 5*).



Figura 4. Chaleco antibalas ligero de la Primera Guerra Mundial. [29]

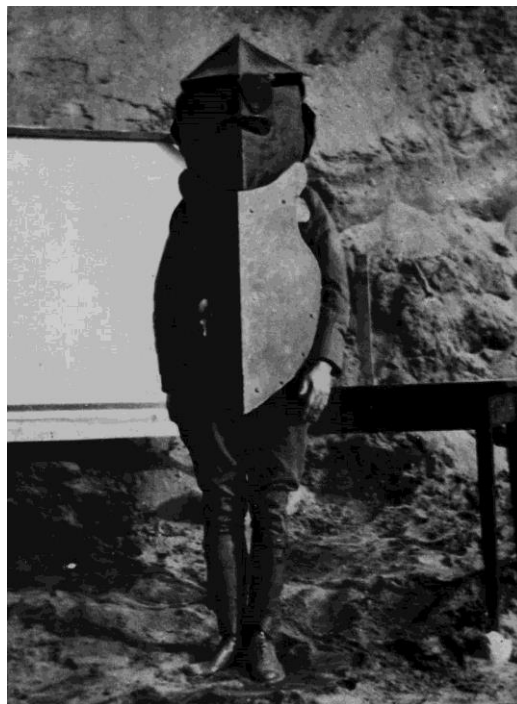


Figura 5. Armadura completa utilizada por las tropas norteamericanas en Francia en 1917. [29]



Por otro lado, durante la Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945) se avanzó en profundidad en el desarrollo de maquinaria bélica como aviones, tanques o cohetes; por ende, el desuso de los chalecos antibala se agravó, ya que estos quedaron relegados a un segundo plano. Un ejemplo de esto eran las protecciones que se otorgaban a paracaidistas aliados (véase *Figura 6*), las cuales estaban diseñadas para detener en cierta medida los fragmentos derivados de fuego antiaéreo. Los materiales con los que se fabricaban consistían principalmente en placas de una aleación de acero con manganeso (entre 12 y 14 %) que le confería alta resistencia a impactos, así como a la abrasión [30].



Figura 6. Armadura de vuelo M1 utilizada por los paracaidistas aliados durante el Desembarco de Normandía el 6 de junio de 1944. [31]

Por último, la invención del *Kevlar*® por parte de Stephanie Kwolek (1923 - 2014) provocó una revolución armamentística en la que, por primera vez, se creó algo que pudiera hacer frente a una bala con altas probabilidades de supervivencia para la persona que lo portaba. Es, por este motivo, que su uso se extendió por todos los rangos militares y de fuerzas de seguridad; lo que mejoró en gran medida las condiciones laborales de las personas dedicadas a estos sectores, salvando miles de vidas en el proceso. [19]



1.3. OBJETIVO Y MOTIVACIÓN.

El presente trabajo fin de grado tiene como objetivo completar los conocimientos requeridos para acceder a la titulación de Ingeniería Mecánica a través del análisis y la viabilidad del uso de fluidos no newtonianos en armaduras contra impactos de alta energía, como los de una bala. No obstante, la motivación última a la que está sometido es la de salvar vidas; idealmente, se pretende que este estudio derive en el desarrollo de protecciones que sean más económicas y accesibles para todo el mundo, no solo a fuerzas armadas de cualquier tipo (militares o policiales), sino a periodistas que reportan en zonas bélicas o a civiles que están viviendo un conflicto armado. Aunque se ha especificado que este documento se centra en el análisis de proyectiles de naturaleza balística por su alta velocidad, el resultado de este estudio podría extrapolarse a otros aspectos como resguardos de vehículos, pantallas protectoras y cualquier otro elemento que requiera absorber impactos de alta energía.

Por otro lado, existen múltiples campos de aplicación de fluidos no newtonianos como los descritos en el apartado 1.7.3. *Otras aplicaciones de fluidos no newtonianos..* En ellos, habita un objetivo secundario, el cual no es otro que la propia investigación para lograr entender el comportamiento tan poco conocido de estos materiales y su naturaleza, especialmente cuando están sometidos a altas velocidades. Si se llegase a caracterizar la conducta de estos fluidos podría derivar en: mejores rendimientos en multitud de procesos industriales, mayor conocimiento de las corrientes magmáticas o mayor previsión y preparación ante el corrimiento de terrenos húmedos, entre otras miles de opciones; en última instancia, este objetivo, aunque en segunda categoría, pretende que dicho documento motive a cualquier persona a continuar con investigaciones y estudios que se adentren en el océano que supone el desconocimiento humano.

“La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia”. Sócrates.

1.4. ALCANCE.

Para comenzar, los fluidos no newtonianos se corresponden con uno de los aspectos físicos menos estudiados en la actualidad; su comportamiento es tan voluble que apenas existe bibliografía, investigaciones, artículos o información referente a estos materiales. Por este motivo, en el presente proyecto habita, en primer lugar en la memoria un estado del arte de las protecciones personales. Tras esto, se puede encontrar un análisis sobre la normativa utilizada para caracterizar los chalecos antibalas modernos. Asimismo, es interesante



encontrar los valores energéticos y tensionales relacionados con los diferentes proyectiles utilizados por dicha normativa. A continuación, está redactada la teoría física sobre la que se fundamentan este tipo de fluidos, así como la viscosidad y otras aplicaciones para los fluidos no newtonianos. Posteriormente, se han analizado dos investigaciones llevadas a cabo por la Universidad de Chicago, las cuales resultan de especial interés por sus estudios caracterizando impactos. En última lugar, se encuentra la solución propuesta para poder obtener resultados más adecuados a la aplicación de los fluidos no newtonianos en chalecos antibalas.

Por otro lado, aparecen en anexos toda aquella información adicional a lo que se ha redactado en el documento principal; algunos de los ejemplos son cálculos adicionales o complementarios que requieren de un análisis más exhaustivo, pero sin la importancia de ir incluido en la memoria. Los planos es el apartado contiguo a este y en él se incluyen las medidas y toda la información geométrica relevante de la solución propuesta.

Por último, se incluye el pliego de condiciones para poder generar de una manera física y única la experimentación, además de un estudio presupuestario estimado de cuál sería el coste de construirlo.

1.5. PROTECCIONES CONVENCIONALES CONTRA ARMAS DE FUEGO.

Debido a la naturaleza comparativa del estudio, se va a proceder a analizar los equipos contra armas de fuego convencionales para dar una primera idea de cómo es su fabricación, las pruebas que deben superar para adquirir la calidad requerida y su comportamiento. Esto tiene el objetivo de que la alternativa, planteada con fluidos, sea caracterizada de manera que los resultados obtenidos sean comparables con un cierto grado cuantitativo, ya que las variables que aquí se presenten con dicha alternativa serán, lógicamente, muy distintas a las que se pudieran obtener en ensayos reales, debido a la inviabilidad de realizar pruebas de fuego.

Estas protecciones se dividen en diferentes categorías en función de: el propósito que tendrán, si son aplicaciones militares, civiles o policiales; del sexo de la persona que lo usará; de la forma de portarlo, si el chaleco será visible o estará oculto por la ropa; de la capacidad defensiva que presente y, por último, de los materiales con los que se adquiere dicha capacidad. 6



1.5.1. Materiales.

Para conocer el comportamiento de cualquier producto es imperativo tener información relativa a cómo y con qué está fabricado; los chalecos antibala no son una excepción a esta afirmación.

Como se ha visto en el apartado anterior, existen multitud de divisiones para agrupar las protecciones anti armas de fuego. En este caso, la redacción se centra en el caso de los materiales.

Para empezar, existen otras dos subdivisiones dentro de la propia categoría: armaduras flexibles y rígidas, cuya diferencia principal radica en el nivel de rigidez del producto final. Por lo tanto, aquellas armaduras que presenten un nivel de rigidez más grande podrán disipar la energía proveniente de mayores calibres, con lo que serán más seguras. Sin embargo, cuanto mayor sea este parámetro también lo será el peso del conjunto completo, así como la incomodidad al portarlo; un aspecto a tener en cuenta.

El grado de rigidez existente en las protecciones es determinado por los componentes balísticos con los que están fabricadas. El número de los mismos puede variar desde ser un único elemento enterizo hasta estar conformado por diferentes compuestos.

Por un lado, algunos de los materiales flexibles más utilizados son: UHMWPE o Polietileno de Ultra Peso Molecular (por sus siglas en inglés, *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*), fibras aramidadas, polímeros PBO (fibras fenileno benzobisoxafol), entre otros. Todos estos componentes tienen los factores en común de estar compuestos por largas cadenas de elementos, lo que les confieren propiedades como una alta resistencia mecánica y térmica; pero, también, de ser materiales cuya fabricación resulta difícil en términos económicos y técnicos, especialmente para las fibras aramidadas y los polímeros PBO. Este es uno de los motivos por los cuales su producción se destina a aplicaciones muy concretas, lo que desemboca en que el coste de adquisición de equipos antibala adecuados sea tan elevado, ya que existen multitud de marcas que comercializan variantes de estos elementos como *Kevlar*®, *Dyneema*® o *Twaron*®. [2], [3], [4], [5]

Por otro lado, componentes más rígidos que fibras poliméricas utilizados para la fabricación de armaduras son, principalmente, metales y cerámicos balísticos. Entre los materiales metálicos se encuentran los aceros UHH (procedente del inglés, *Ultra High Hardness*), aleaciones de aluminio y de titanio [6]. Las propiedades mecánicas son muy diversas entre



cada uno de los citados componentes, las cuales se ven influenciadas por la presencia de determinados elementos; por lo tanto, la efectividad balística también será extremadamente variable. Sin embargo, los materiales cerámicos no presentan tal grado de variabilidad en sus propiedades, por lo que resultan una opción especialmente válida. La alúmina u óxido de aluminio (Al_2O_3) junto con el carburo de boro (B_4C), el carburo de silicio (SiC) o el dióxido de circonio (ZrO_2) son algunos de los compuestos sobre los que mayoritariamente se centra la fabricación de protecciones de base cerámica. [7]

Por último, y como recordatorio, se ha indicado que se puede hacer distinción entre equipos antibala en función del nivel de rigidez que presentan los materiales con los que se han fabricado. No obstante, se debe tener en cuenta que para lograr una defensa suficiente y adecuada, las empresas productoras utilizan distintas combinaciones, y a diferentes capas, de los mencionados compuestos para que exista una comunión entre sendas propiedades con el fin de que el producto final presente aquellas que son deseadas.

1.5.2. Proceso de fabricación.

Este proceso consta de diferentes etapas en función de la armadura que se desee manufacturar [8]. En primera lugar, todos los chalecos están fabricados mediante largos y finísimos hilos de fibras poliméricas; estos elementos se trenzan para formar conjuntos con grosores más grandes, que a su vez, son trenzados nuevamente para obtener láminas de dichas fibras (véase *Figura*), cuyas dimensiones suelen ser de unos cientos de metros; por lo tanto, es necesario someterlas a un proceso de corte para que adquieran dimensiones propias de un cuerpo humano. Tras esto y aunque las láminas, por sí solas, ya presentan ciertas propiedades balísticas, la adecuada capacidad defensiva aparece cuando se superpone un conjunto de ellas, cosiéndolas entre sí. El número de capas que lo conforme será delimitante para designar el nivel de protección del chaleco.

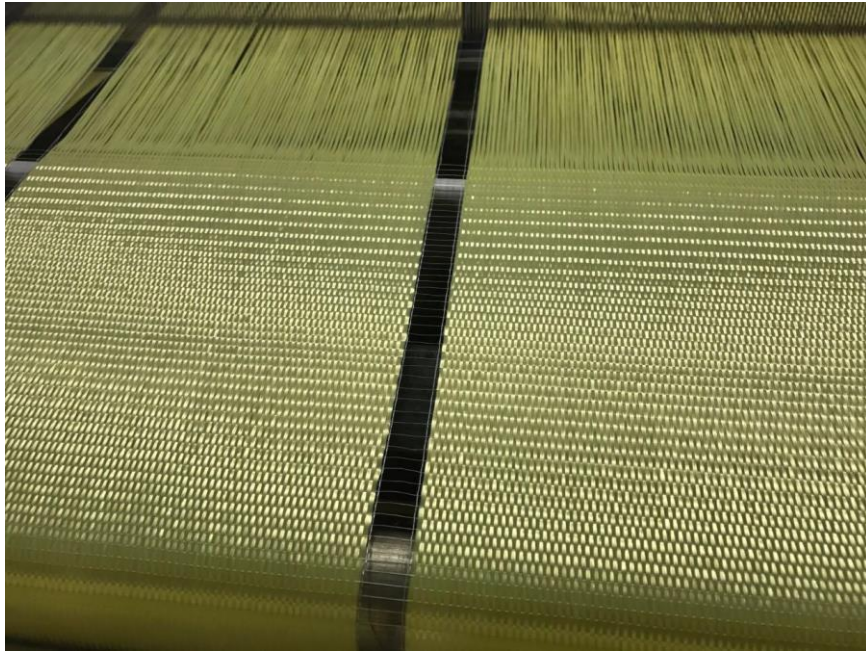


Figura 7. Proceso de trenzado de fibras aramidas. Apréciase el fuerte entrelazamiento que presentan. [9]

Cuando todas las láminas están correctamente cosidas y han adquirido la forma y tamaño necesarios, se las recubre con una envoltura termosellada para evitar que agentes externos pudieran degradar su correcto funcionamiento (véase *Figura*).

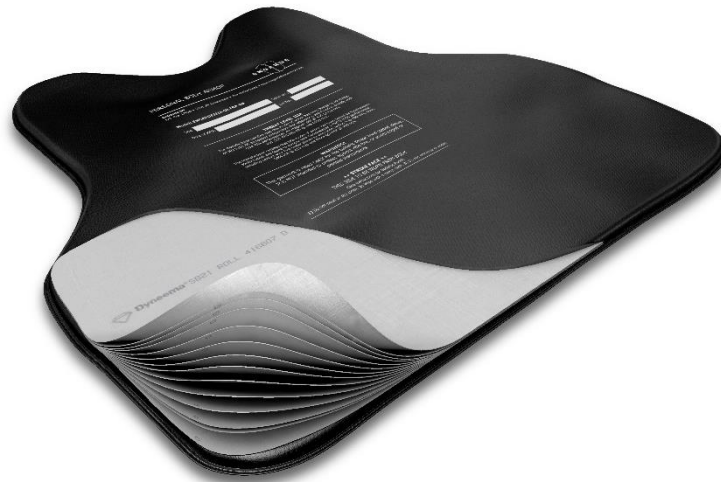


Figura 8. Panel balístico. Se puede apreciar cada una de las láminas que lo conforman, así como la capa protectora que las envuelve. [10]



Como etapa final, el panel balístico resultante es cosido al chaleco en sí, también hecho de fibras entrelazadas, para servir como funda y para que pueda ser portado con mayor facilidad (véase *Figura*). Aunque este tipo de armadura es de las más fabricadas por ser de las más accesibles, existen diferentes alternativas a esta.



Figura 9. Protección antibala hecha mediante fibras trenzadas. Este tipo de chalecos suelen ser los más comunes entre cuerpos de seguridad. [11]

Por un lado, se puede sustituir el panel hecho de polímeros por una placa balística manufacturada de materiales más resistentes como aceros o cerámicas. El proceso de fabricación es equivalente al descrito, pero con la peculiaridad de que la protección principal es proporcionada donde se encuentra el, o los componentes más rígidos (generalmente torso y espalda), ya que el número de fibras no son suficientes para otorgar una adecuada protección. Las placas se insertan en bolsillos donde son fijadas. Este tipo de armadura otorga, con lo cual, una protección más elevada, aunque también, menos distribuida y más pesada (véase *Figura*). Un factor a tener en cuenta en este modelo de equipo es que las placas pueden ser intercambiables siempre y cuando los espacios de la funda donde se albergan estén en buenas condiciones.

Por otro lado, y para finalizar, existen modelos híbridos entre los dos redactados, los cuales poseen un nivel de defensa bastante aceptable con una buena comodidad. Estos diseños utilizan las propiedades de las fibras poliméricas junto con materiales metálicos y cerámicos para conseguir un equilibrio entre las ventajas de uno y los inconvenientes del otro.



Figura 10. Chaleco antibalas de placas. Puede apreciarse que a primera vista presenta menos protección que el mostrado en la Figura . [12]

1.5.3. Pruebas y ensayos.

Existen multitud de normativas que recogen los niveles de seguridad que puede aportar un determinado chaleco: NIJ Standard-0101.06, GOST R 50744–95, VPAM, etcétera. Generalmente, estas reglas presentan unos estándares, pruebas y resultados distintos debido a que cada una de ellas es desarrollada por un país (o un conjunto de ellos) diferente, por lo que es imperativo el uso de tablas de equivalencia para relacionar unas con otras. El presente documento se ha basado en el estándar norteamericano 0101.06 desarrollado por el Instituto Nacional de Justicia o NIJ (2008) por sus siglas en inglés, debido a que es el más extendido y del cual derivan muchas de las otras reglas, aunque el análisis sería equivalente a si se realizase según los preceptos de normas europeas como VPAM o rusas como GOST. 6, [13]

Es interesante mencionar que algunas de estas normativas recopilan ensayos contra armas blancas, como cuchillos, con el fin de que las protecciones estudiadas bajo las indicaciones de las mismas presenten un sello de mayor calidad. En este caso, la normativa 0101.06 no recoge ninguna de estas acciones, las cuales quedan descritas en la norma 0115.00.

Para comenzar, en este apartado se clasifican las armaduras en función del nivel de protección que otorgan, es decir, con relación de unos calibres que pueden soportar las mismas, siendo:

- Tipo IIA: 9 milímetros y .40 pulgadas S&W.
- Tipo II: 9 milímetros y .357 pulgadas Magnum.



- Tipo IIIA: .357 pulgadas SIG y .44 Magnum.
- Tipo III: 7,62 milímetros (masa de 9,6 gramos).
- Tipo IV: 7,62 milímetros (masa de 10,8 gramos).

Cada uno de los diámetros mencionados en la parte superior lleva asociado una velocidad en metros por segundo (m/s); posteriormente, se analizará la energía asociada a ellos (véase *Anexo 2.1.1. Tensión tangencial en la superficie de los diferentes proyectiles.*).

Antes de empezar el proceso de ensayo, se deben realizar unas acciones previas al conjunto de muestras otorgado por el fabricante y cuyo número debe rondar varias decenas dependiendo de qué nivel de protección ofrezcan (armaduras flexibles o rígidas); así como del tallaje de las mismas, pues se necesita una mayor cantidad de equipos con tamaños grandes. Las acciones a realizar consisten en dividir el conjunto total con el objetivo de que el 30 % de ellas sean sometidas al efecto de diferentes ambientes con temperatura y humedad durante varios días; mientras que, por el contrario, el 70 % restante se prueben sin sufrir la acción de ningún agente externo. Estos porcentajes representan un carácter genérico, pues dependiendo de las especificaciones del fabricante y de la propia protección pueden variar.

Una vez que las armaduras se hayan condicionado, se procederá a realizar sobre todas ellas el ensayo de penetración. La magnitud medida en esta prueba se analizará a través de dos parámetros siguiendo las indicaciones de la norma: el P-BFS o *Perforation – Backface Signature* (véase *Figura*), el cual da respuesta a la distancia que puede penetrar una bala desde la superficie del chaleco, por lo tanto es una medida de la resistencia balística a la perforación y a los traumatismos derivados de los propios impactos; y el BL o *Ballistic Limit*, cuyo valor mide la velocidad a la que viaja un proyectil que perfora la protección la mitad de las ocasiones, es decir, se trata del parámetro donde radica el efecto estadístico y la confiabilidad de los resultados; motivo por el cual el estudio con fluidos se centrará únicamente en la penetración, medida según el P-BFS, que estos pueden sufrir.

En toda experimentación es fundamental conocer qué se debe medir y cómo lograrlo. Es, por tanto, bajo esta premisa que la norma utilizada recoge la configuración de montaje, además de los instrumentos de los que se hace uso (véase *Figura*). Dicha estructura consiste en un cañón situado a una distancia concreta de la protección objetivo; esa longitud es dependiente de la clase de arma que dispara la bala, pudiendo ser un arma de mano o un rifle y cuya diferencia fundamental entre ambos elementos es la longitud del cañón por el que es



impulsado el proyectil. En el caso de armas de mano, la distancia se debe fijar en 5 metros; mientras que en el caso de rifles, esta distancia debe ser de 15 metros, aproximadamente.

Cabe mencionar que la normativa recomienda que las armaduras sean probadas en su versión definitiva de uso, de tal manera que se pueda recrear en mayor grado las condiciones reales que experimentarán, aunque existen excepciones como es el caso de ensayos sobre placas balísticas.

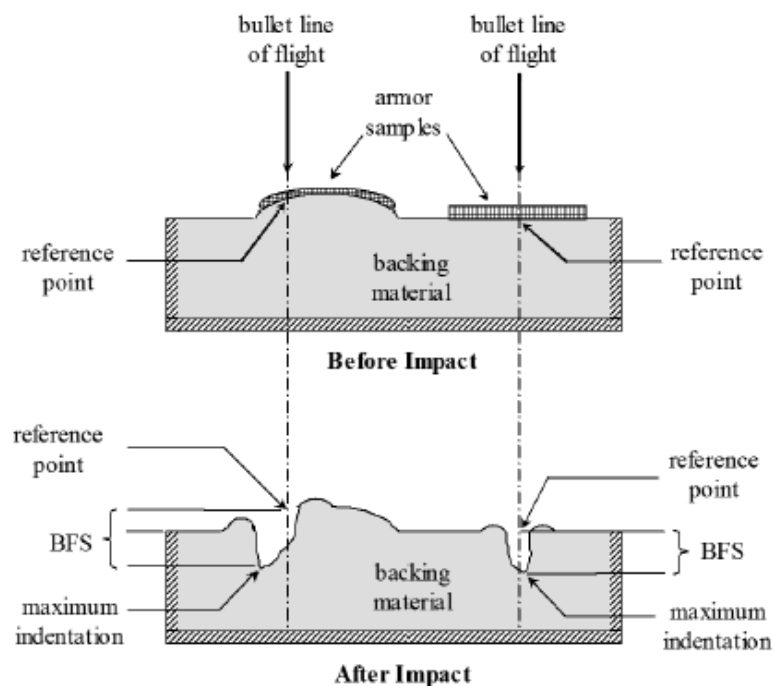


Figura 11. Ilustración esquemática de la penetración de un proyectil según el parámetro P-BFS. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13]

Adicionalmente, entre cañón y armadura se dispone un tercer elemento que mide la velocidad del proyectil al pasar entre dos puntos referenciados, dicho instrumento se conoce como cronógrafo balístico y, comúnmente, es utilizado por pares para asegurar una adecuada exactitud de las mediciones.

Para acabar, es importante saber cuál es el ángulo de entrada del proyectil en el momento del impacto, luego es preciso la medición de esta variable mediante el uso de fotogrametría; una técnica de alta precisión que permite obtener la posición y orientación del objeto deseado a través de la toma de imágenes. Generalmente, se tomará como un disparo válido todo aquel en el que el proyectil alcance su objetivo con un ángulo comprendido entre $\pm 5^\circ$ respecto a



su eje axial, aunque puede indicarse el caso de realizase pruebas con ángulos de incidencia determinados.

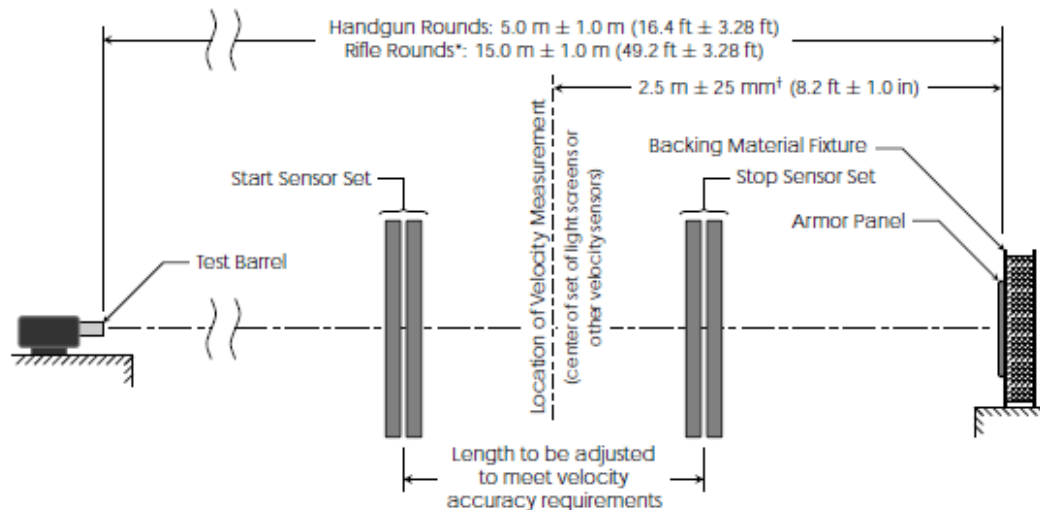


Figura 12. Modelo del montaje con el que se realizan los disparos de los proyectiles. Puede observarse que las distancias están condicionadas por el calibre de los mismos. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13]

1.5.4. Resultados de los ensayos.

En el apartado anterior se ha descrito en qué consiste el ensayo de penetración de proyectiles en base a la normativa utilizada. Adicionalmente, se ha explicado cuáles son los parámetros de interés a medir durante el mismo. Sin embargo, en esta sección se analizará cuáles son los resultados de dichos parámetros y para qué rango de valores se incluyen.

En primer lugar, es importante remarcar que la prueba se realiza un número de seis veces, o dicho de otra manera, se ha de disparar un total de seis proyectiles por cada chaleco. La ubicación de cada uno de ellos debe ser registrada y comparada con unos valores límite (véase Figura), los cuales son la distancia desde el punto donde impacta el disparo hasta el borde del chaleco (*shot-to-edge distance*); y la longitud medida entre dos disparos consecutivos (*shot-to-shot distance*). Para la primera de ellas, el valor no puede ser superior a 51 o 76 milímetros, en función de si se trata de la bala con menos o con más masa, respectivamente (véase Tabla 1). No obstante, la segunda longitud debe ser como mínimo de 51 milímetros.

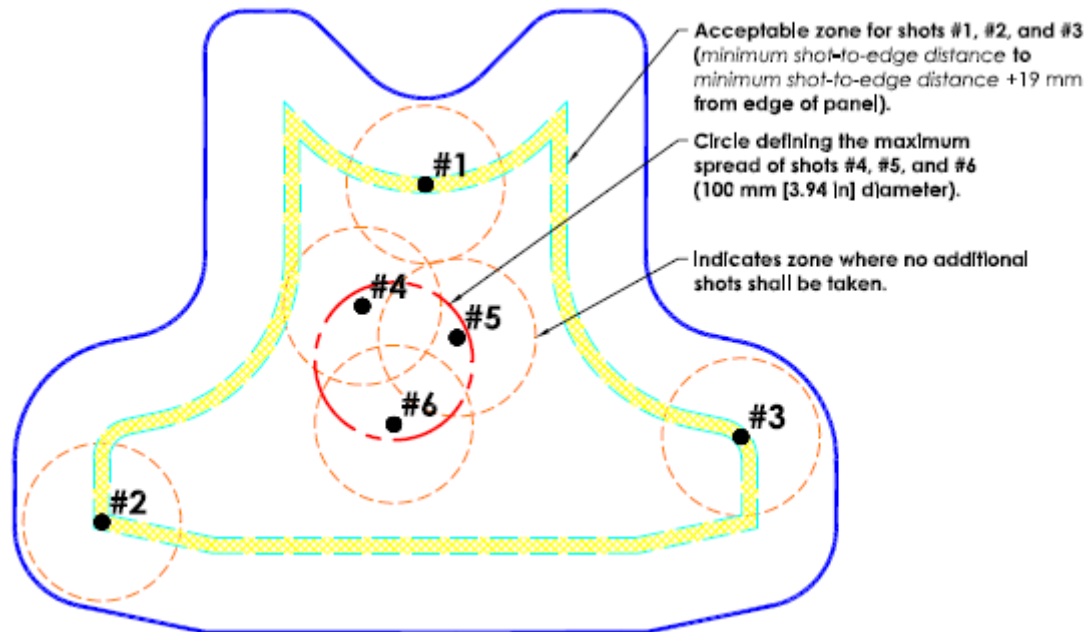


Figura 13. Localización de las zonas de tolerancia donde se deben focalizar los impactos. Esta imagen es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13]

Por otro lado, puede ocurrir que tras el impacto de los proyectiles, estos no hayan generado ningún tipo de penetración significativa en los chalecos, algo totalmente deseado. Sin embargo, se define en 44 milímetros la profundidad máxima de penetración permitida para todos los tipos de armaduras mencionados, es decir, el límite admisible en el parámetro P-BFS para un disparo válido. Se considera válido todo aquel que cumple las condiciones descritas de incidencia angular, distancia entre disparos (*shot-to-shot distance*), longitud de impacto y borde de la armadura (*shot-to-edge distance*).

En todo proceso en el que se precise de técnicas metrológicas de cualquier tipo, entra en juego el papel de la tolerancia y de la incertidumbre. Cada una de las variables que se han indicado, presentan unos valores de tolerancia que no requieren de una precisión excesivamente elevada (del orden de unidades de milímetro para las penetraciones, por ejemplo). Esto se debe a que un milímetro puede suponer una diferencia vital para una persona herida con un impacto de bala; motivo por el cual, la normativa hace referencia a que todos los parámetros deben ser medidos varias veces para cada ocasión.

Como resumen de lo descrito, la norma NIJ 0101.06 facilita una tabla en la que se recopilan las condiciones que se deben dar para poder efectuar un ensayo completo y válido (véase *Tabla 1*).



Tabla 1. Aspectos condicionantes durante la prueba de penetración de la normativa NIJ 0101.06.
Esta tabla consiste en una recopilación de las indicaciones descritas con anterioridad en el documento y es propiedad de: National Institute of Justice (2008). [13]

Armor Type			TEST VARIABLES			PERFORMANCE REQUIREMENTS				SHOT REQUIREMENTS				
			Test Bullet	Bullet Mass	Conditioned Armor Test Velocity*	New Armor Test Velocity*	Hits Per Panel at 0° Angle	Maximum BFS Depth	Hits Per Panel at 30° or 45° Angle†	Shots Per Panel	Panel Size	Panel Condition	Panels Required	Shots Required
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	373 m/s (1225 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
	2	.40 S&W FMJ	11.7 g (180 gr)	325 m/s (1065 ft/s)	352 m/s (1155 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	379 m/s (1245 ft/s)	398 m/s (1305 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
	2	.357 Magnum JSP	10.2 g (158 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 g (125 gr)	430 m/s (1410 ft/s)	448 m/s (1470 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
	2	.44 Magnum SJHP	15.6 g (240 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	24
										Small	New Conditioned	2	12	12
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147 gr)	847 m/s (2780 ft/s)	-	6	44 mm (1.73 in)	0	6	All	Conditioned	4	24	24
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10.8 g (166 gr)	878 m/s (2880 ft/s)	-	1 to 6	44 mm (1.73 in)	0	1 to 6	All	Conditioned	4 to 24	24	24
Special	-	Each test threat to be specified by armor manufacturer or procuring organization. Armor performance and shot requirements shall depend on armor type.												
*Target measurement velocity. Fair hit measurement velocities must be within ± 9.1 m/s (± 30 ft/s) of this value, as defined in Section 7.6.														
†Each armor that is to be shot at angles other than 0° shall be shot once at a 30° angle and once at a 45° angle.														

*Target measurement velocity. Fair hit measurement velocities must be within ± 9.1 m/s (± 30 ft/s) of this value, as defined in Section 7.6.

†Each armor that is to be shot at angles other than 0° shall be shot once at a 30° angle and once at a 45° angle.



Por último, se ha indicado anteriormente que el presente documento no se iba a centrar en el análisis de valores estadísticos, como es el caso del parámetro BL (véase apartado 1.5.3. *Pruebas y ensayos*). No obstante, es importante mencionar que la normativa utilizada delimita la probabilidad de que se supere la medida de 44 milímetros en penetración para un conjunto de chalecos en un valor inferior al 20 % con una confianza del 95 %. De esta manera, se tiene en cuenta el efecto de posibles errores que pudieran contaminar los resultados de calidad de una determinada protección.

1.6. DISIPACIÓN ENERGÉTICA DE LOS PROYECTILES.

Con la información recopilada en el apartado anterior, se va a proceder a analizar la energía que debe ser disipada de un proyectil concreto por un fluido; en este caso, dicho proyectil es de 9 x 19 milímetros (véase *Figura*). El motivo para analizar este calibre es debido a que se trata de uno de los que la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) tiene como estándar para sus armas. Adicionalmente, se trata de una de las balas más utilizadas por fuerzas policiales en todo el mundo. [24]



Figura 14. Proyectil de 9x19 milímetros Luger. [25]

Aunque el estudio energético disipativo se procederá con el calibre indicado, cabe destacar que el resto de ellos se analizarán en conjunto y de manera más resumida en el apartado de *Anexos, epígrafe 2.1.1. Tensión tangencial en la superficie de los diferentes proyectiles*.

Por otro lado, es necesario mencionar que todos los cálculos asociados a este proyectil se han redactado en el documento: *Memoria* para facilitar la compresión y continuidad del texto; en cambio, el resto de balas se han indicado en conjunto en el apartado de: *CÁLCULOS*.



Por último, es importante destacar el hecho de que tanto en este documento como en la normativa NIJ 0101.06 no se han tenido en cuenta el efecto de la tecnología del propio proyectil, la cual puede influir sobremanera en su penetración. Un claro ejemplo de esto, sería si se comparase una bala encamisada (*Full Metal Jacket o FMJ*) con una de punta hueca (*hollow point*); el segundo de los casos presenta unas estrías en la punta de la bala que en el momento del impacto hace que se expandan hasta casi 3 veces su diámetro, lo que libera la energía en el interior del objetivo, provocando así, unos daños mayores a costa de reducir la penetración de la misma (véase *Figura 15*).



Figura 15. Comparación de dos proyectiles FMJ (izquierda y derecha de la fotografía) con uno de punta hueca (centro de la imagen). Pueden apreciarse las marcas en la punta de la bala central que hacen que se expanda. [32]

1.6.1. Cálculo energético.

El estudio del lanzamiento de cualquier tipo de proyectil, así como de su trayectoria en un medio se realiza siguiendo un balance de energías entre diferentes posiciones a lo largo de su movimiento. Las energías que intervienen desde que se inicia la ignición dentro del cañón del arma hasta que se alcanza el impacto son muy variadas. Sin embargo, para el análisis que atañe a la normativa descrita en el apartado anterior (NIJ 0101.06 de 2008), únicamente se ha tenido en cuenta el efecto de la energía cinética que presenta el proyectil, ya que la energía potencial es despreciable frente a ella:

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

Ecuación 1. Energía potencial gravitatoria.

De la expresión superior (*Ecuación 1*), puede observarse que si la diferencia de alturas (término Δh) es nulo, el conjunto también lo será, independientemente del valor que presente



la masa (m) o la aceleración del campo gravitatorio terrestre ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Por tanto, la energía que presenta una bala en este entorno queda reflejada en la siguiente ecuación (*Ecuación 2*):

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

Ecuación 2. Energía cinética.

Las armaduras de tipo II y de tipo IIA se comprueban usando proyectiles de calibre 9 milímetros, la diferencia entre ambas radica en las velocidades a las que estos son impulsados. Debido a que la normativa distingue entre armaduras nuevas y condicionadas, también se hace una distinción a las velocidades de impacto para cada una de ellas, pero dado que las protecciones que no han sido sometidas a efectos condicionantes presentan un valor más que pequeño de esta magnitud, se ha escogido hacer los consiguientes cálculos con el valor más alto, es decir 398 m/s , correspondiente a defensas nuevas de tipo II (véase *Tabla 1*). Es importante mencionar que existe un valor de tolerancia de $\pm 9,1 \text{ m/s}$ a cualquiera de las velocidades, por lo que ese margen también existirá para la energía; por tanto, con el objetivo de mayorar las tensiones, se ha tomado el valor de $407,1 \text{ m/s}$.

Conociendo la masa que presentan estos proyectiles, 8 gramos, es posible obtener la energía cinética del proyectil:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,008 \text{ Kg} \cdot 407,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 662,92 \text{ J}$$

1.6.2. Cálculo de superficie.

Una vez que ya se ha obtenido la cantidad de energía de la que dispone una bala del calibre mencionado en el ensayo de penetración, es necesario conocer cuál es el área lateral que presenta la misma, ya que las tensiones cortantes recorren dicha superficie debido al efecto rozante de las capas fluidas que se opondrían a su movimiento (véase *apartado 1.7.1. Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos*).

Las medidas dimensionales se han recopilado de la información proporcionada por el Instituto de Fabricantes de Armas y Municiones Deportivas, o SAAMI por sus siglas en inglés (Sporting Arms and Ammunition Manufactures' Institute) [26]. No obstante, para determinar el área real lateral que presenta se requiere conocer cuál es la curva exacta que sigue su geometría.



Debido a que esa información es conocida por los fabricantes de armamento, se ha decidido aproximar el volumen de la bala como si fuera un cono apoyado sobre un cilindro (véase *Figura 16*).

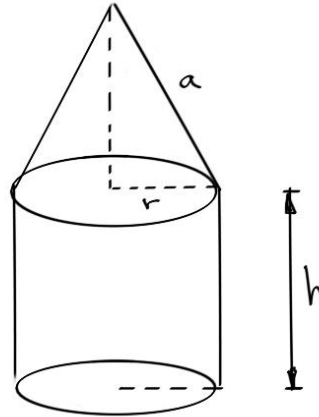


Figura 16. Ilustración que se seguirá para aproximar la geometría del proyectil de 9 milímetros.

Con la imagen superior es más sencillo observar la siguiente relación para las superficies laterales:

$$A_{total} = A_{cilindro} + A_{cono}$$

Ecuación 3. Área total aproximada de los laterales de un proyectil.

Gracias a las medidas del SAAMI (véase *Figura 17*), es posible obtener el valor de superficie:

$$A_{cilindro} = 2\pi \cdot r \cdot h = 2\pi \cdot 4,5 \cdot 6,2 = 175,3 \text{ mm}^2$$

$$A_{cono} = \pi \cdot r \cdot a = \pi \cdot 4,5 \cdot 11,69 = 165,26 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 2\pi \cdot r \cdot h + \pi \cdot r \cdot a = 175,3 + 165,27 = \mathbf{340,56 \text{ mm}^2}$$

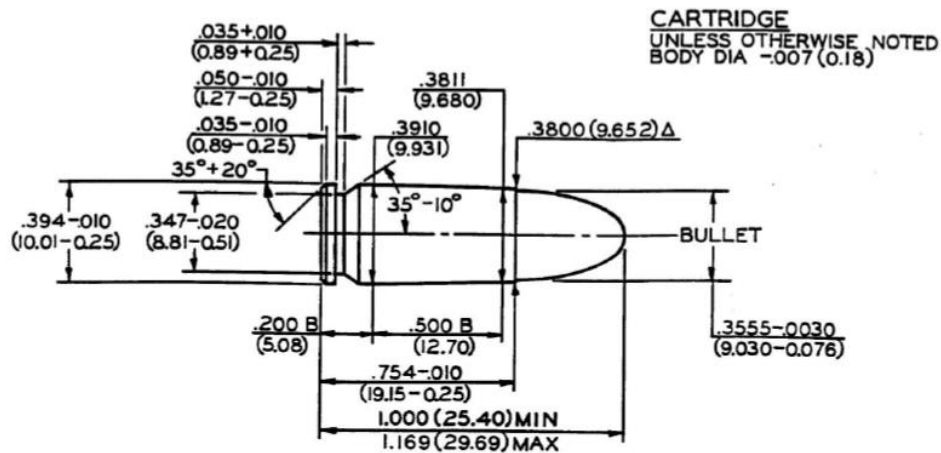


Figura 17. Medidas de un proyectil de 9 milímetros. Esta imagen es propiedad de: SAAMI. [26]

1.6.3. Cálculo tensional.

Las tensiones que experimenta una bala penetrando en un fluido harán que esta se acabe deteniendo debido a que cada capa infinitesimal de partículas fluidas presenta una velocidad distinta, por lo que surgirá un gradiente de velocidades que incrementará el rozamiento entre dichas capas, deteniendo el proyectil. La naturaleza de estas tensiones es de carácter tangencial o cortante, es decir, que las fuerzas que las generan son tangenciales a la superficie del cuerpo en el que existen.

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{cortante}}}$$

Ecuación 4. Tensión tangencial o cortante.

Dado que la energía se define como la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo, se ha hecho uso de la Ecuación 5 para determinar cuál es la fuerza con la que impactaría un cuerpo con la energía calculada en el apartado 311.6.1, es decir: 662,92 julios (J).

$$W = F \cdot d$$

Ecuación 5. Expresión del trabajo como la relación de fuerza y desplazamiento.

La distancia que recorre el cuerpo con esa energía cinética en el ensayo de penetración BFS varía en función de la longitud del cañón con el que es impulsado (véase Figura). De esta manera, se ha determinado tomar la longitud más desfavorable con el fin de que incremente



el valor de la fuerza con la que impacta; para el caso del calibre escogido, esa medida es de cuatro metros. Por lo tanto:

$$662,92 J = F \cdot 4 m \Rightarrow F = 165,73 N$$

Con lo que:

$$\tau = \frac{165,73 N}{340,56 mm^2} \cong 0,487 MPa$$

La cantidad de fuerza por unidad de superficie, o pascal (Pa), obtenida es la misma que experimentarían las partículas de un fluido cuando un proyectil se encontrase en su seno. Concretamente, las partículas fluidas que estuviesen más próximas al cuerpo de la bala sufrirían unas tensiones más próximas a ese valor que las que se encontrasen más alejadas; esta diferencia entre tensiones tangenciales se refleja en la viscosidad (*véase apartado 1.7.1. Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos.*).

1.7. PRINCIPIO DE PROTECCIONES VISCOSAS CONTRA ARMAS DE FUEGO.

En los apartados previos del presente documento se han redactado y analizado los aspectos técnicos que engloban a los equipos convencionales contra armas de fuego. La finalidad, como se ha indicado, es poder contrastar fehacientemente la posibilidad de utilizar fluidos no newtonianos en aplicaciones defensivas.

En los párrafos posteriores de esta rúbrica se ha planteado una situación experimental hipotética, aunque realizable, según por la cual se establece un encofrado de metacrilato que contenga al fluido que va a ser sometido al impacto de un proyectil de 9 milímetros (*véase apartado 1.9. SOLUCIÓN PROPUESTA.*). Esta tesitura ha sido abordada para poder obtener datos reales y no simulados para así, comprobar matemáticamente los valores energéticos y de disipación viscosa que debería tener el fluido para lograr detener dicha bala. Cabe mencionar que el resto de calibres introducidos serán analizados análogamente en los correspondientes apartados dentro de: 2.1. CÁLCULOS. (*véanse 2.1.1 y 2.1.2.*).

Por otro lado, la geometría del fluido encapsulado en el armazón es la de un prisma rectangular de 500 milímetros de longitud (parámetro *a*), con 200 milímetros para la altura (parámetro *b*) y la anchura (parámetro *c*), tal y como puede verse en la *Figura 18*. Las



dimensiones, así como la morfología del cuerpo se han escogido debido a que se trata de un modelo ampliamente utilizado con geles balísticos sólidos para comprobar la penetración de proyectiles, ya que permite visualizar el recorrido de los mismos y la expansión que produce en el seno del material (véase *Figura 19*).

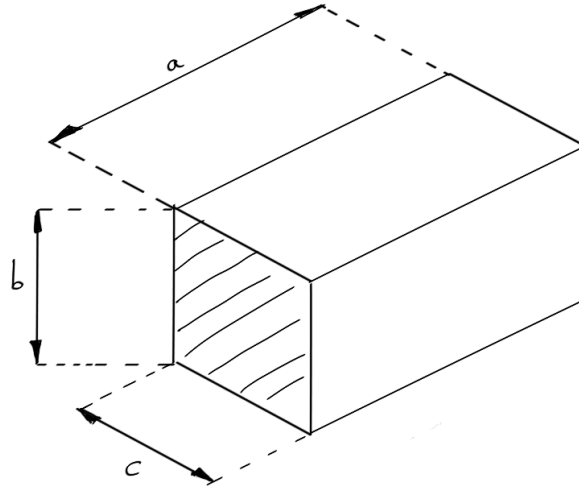


Figura 18. Boceto del volumen que debería adaptar el fluido en la situación propuesta. Apréciase que la cara sombreada es aquel plano sobre el que incidiría el proyectil.

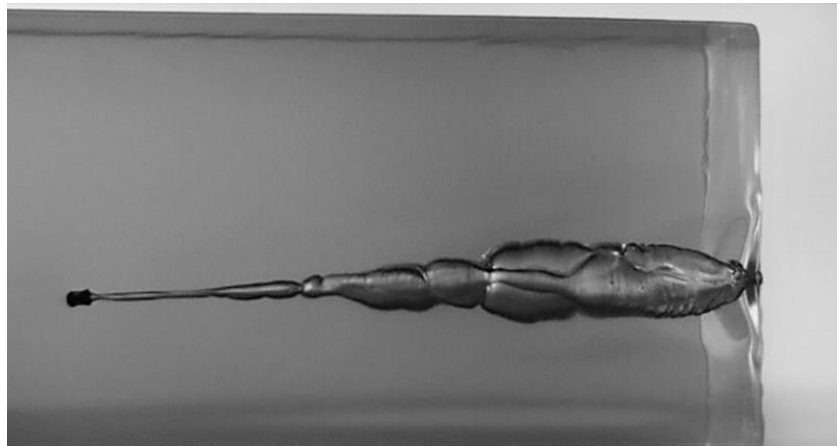


Figura 19. Trayectoria descrita por un proyectil (calibre 4,5 mm) de un arma de aire comprimido al impactar sobre una muestra de gel balístico. [33]

1.7.1. Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos.

La mecánica de fluidos es una de las ramas más complejas de la física y su desarrollo está profundamente ligado a la toma de aproximaciones hacia casos más simples.



Antes de comenzar con el desarrollo matemático, es preciso indicar qué es un fluido. Fundamentalmente existen tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Entre ellos, la diferencia más importante se encuentra en las fuerzas de unión entre las partículas que los componen, lo que condiciona el movimiento de las mismas. Dichas fuerzas resultan muy elevadas para el estado sólido, lo que confiere propiedades como la conservación de su forma, que puede oponer resistencia a deformaciones cortantes, etcétera. Sin embargo, los estados líquido y gaseoso se engloban en un término denominado fluido, para el cual, ambas situaciones de agregación no son capaces de soportar ningún tipo de deformación ante un esfuerzo tangencial; esto les permite adaptarse al volumen y a la geometría del recipiente que los contiene.

En este trabajo fin de grado, como en cualquier tipo de estudio, es preciso conocer cuáles son las variables que intervienen en el mismo. De esta manera, uno de los parámetros principales sobre el que se centra la atención no es otro que la viscosidad y cuya definición es la oposición que ejerce un fluido a su propio movimiento, lo que implica que no es capaz de soportar ningún tipo de deformación tangencial o cortante, mientras que sí puede oponerse a la velocidad a la que sucede dicha deformación.

Conociendo, por tanto, los términos de fluido y viscosidad, se va a proceder a obtener la expresión que relaciona esta segunda magnitud con las tensiones cortantes que puede sufrir un material como el primero.

Para empezar, es necesario definir una situación de movimiento como la que puede apreciarse en la imagen inferior (*Figura 20*), en la que se presenta el caso en dos dimensiones de una porción de fluido rectangular infinitamente pequeña. Se supone que el lado AB está ligado a un cuerpo fijo, mientras que el lado opuesto CD está entrelazado a un cuerpo que sí presenta un movimiento en el eje de abscisas y de velocidad u (se ha tomado la condición de que no existe velocidad inicial, por tanto $u = 0 \text{ m/s}$). Debido a esto, dicha cara del elemento diferencial presenta una fuerza F , la cual provoca una deformación de carácter angular ($d\theta$) caracterizada por el desplazamiento de los puntos C y D a las posiciones C' y D', respectivamente; y cuyo valor viene dado por el producto de la velocidad con el tiempo, ambos parámetros diferenciales. [28]

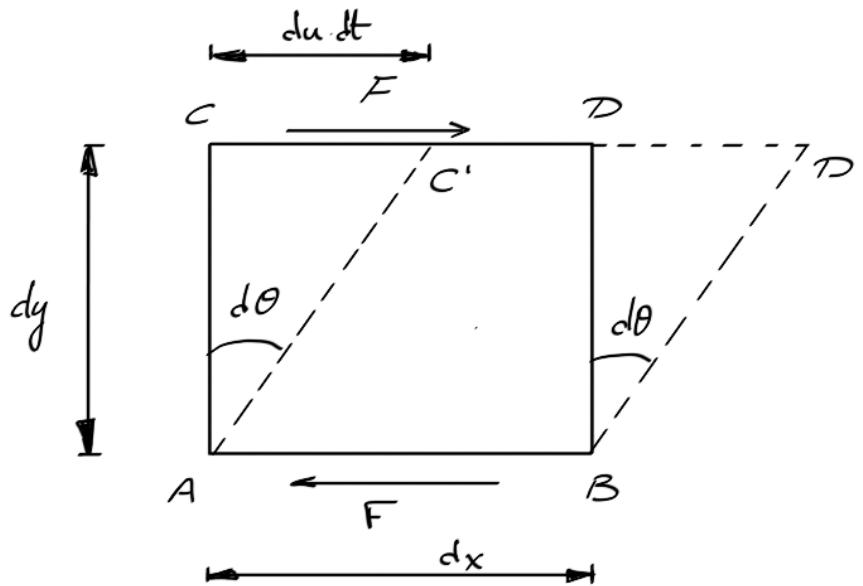


Figura 20. Elemento diferencial de fluido sometido a esfuerzo cortante. Las líneas discontinuas representan la deformada que sufre.

Basándose en la expresión de la tensión tangencial o cortante (véase Ecuación 4), pero aplicada al elemento infinitamente pequeño, resulta:

$$F = \tau \cdot dA_{\text{cortante}}$$

Cuyo valor tensional también está relacionado con la velocidad de deformación que sufre el fluido:

$$\tau \propto \frac{d\theta}{dt}$$

En la que:

$$\text{tg}(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy}$$

Debido a que el elemento diferencial es extremadamente pequeño (tiende a ser cero), se puede realizar la aproximación de igualar la tangente del ángulo deformado con el propio ángulo:

$$\text{tg}(d\theta) \cong d\theta \Rightarrow d\theta = \frac{du \cdot dt}{dy} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$



Por lo tanto, usando la proporcionalidad de las tensiones cortantes con la velocidad de deformación:

$$\tau \propto \frac{d\theta}{dy} \Rightarrow \tau \propto \frac{du}{dy}$$

Lo que significa que a cada altura del fluido existe una capa de material que se mueve con una velocidad concreta; dichas capas fluidas tendrán una velocidad más pequeña conforme se alejen de la tensión que las origina; mientras que, el valor será más alto al acercarse. Este gradiente infinitesimal de velocidades puede ser caracterizado de una forma lineal, con lo cual la expresión superior quedaría de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$

Ecuación 6. Ley de Newton.

Donde el parámetro μ es la viscosidad dinámica y cuyas unidades son: Pa · s; o lo que es lo mismo: Kg/m · s en unidades fundamentales. Adicionalmente, se puede definir la viscosidad cinemática (ν) como el resultado de la división de la dinámica entre la densidad del material. En el presente documento, cuando se hable sobre viscosidad se hace referencia a la primera de ellas, es decir, a la viscosidad dinámica.

Cabe destacar que el desarrollo matemático realizado en este apartado implica un comportamiento lineal y, por tanto, se trata del estudio para fluidos newtonianos. El caso de aquellos que son denominados como no newtonianos supone que su conducta es no lineal, con lo cual, resultan los más difíciles de caracterizar (véase *Figura 21*). Asimismo, es interesante hacer mención que la viscosidad, como propiedad de un fluido, está condicionada por el estado de este, el cual es cambiante en función de la presión y de la temperatura, ergo dicha propiedad también varía con ambas magnitudes. [28]

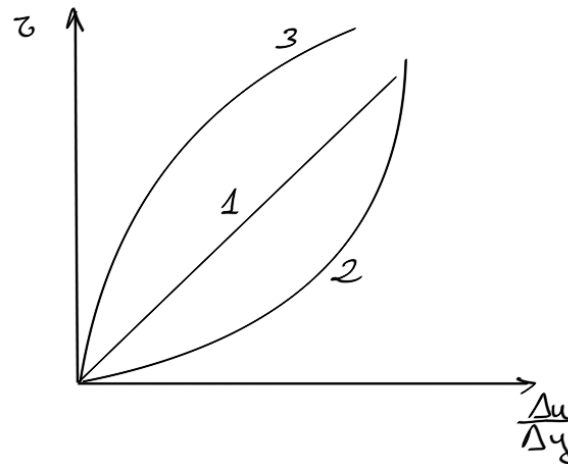


Figura 21. Representación bocetada de la viscosidad. La línea 1 es indicativa de un fluido newtoniano. Sin embargo, las líneas 2 y 3 corresponden con uno no newtoniano. El número 2 se relaciona con un fluido dilatante; mientras que el tercero, con un pseudoplástico.

Para finalizar, en la imagen superior se ha retratado la viscosidad como la relación de las tensiones tangenciales y el gradiente de velocidades en un elemento fluido. En ella, puede observarse la naturaleza lineal y no lineal. Este comportamiento puede ser observado de forma análoga en la siguiente ilustración (*Figura*):

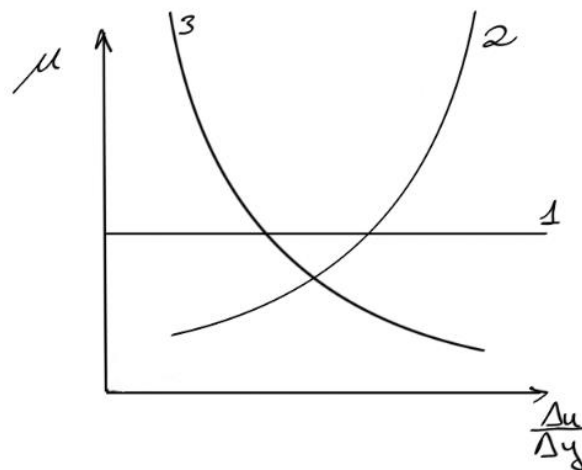


Figura 22. Representación en boceto de la tensión tangencial. La línea 1 corresponde con un fluido newtoniano, mientras que las 2 y 3 con uno no newtoniano. La relación 2 ampara el comportamiento dilatante, pero el caso 3 el de un pseudoplástico.

Por último, es apropiado analizar de forma escrita, además de la visual, la diferencia entre un fluido no newtoniano de carácter pseudoplástico y uno de carácter dilatante. Observando las dos imágenes anteriores, especialmente la *Figura 22*Figura , puede verse que ante una mayor velocidad de deformación de cada una de las capas viscosas (eje de abscisas), la viscosidad



crece de manera muy rápida para un fluido dilatante (eje de ordenadas), similar a una función exponencial en la ilustración; mientras que, por otro lado, para un comportamiento pseudoplástico, la viscosidad va disminuyendo según la velocidad va en aumento. Son, por lo tanto, comportamientos opuestos. Para facilitar la visualización de esta diferencia, se plantea la situación hipotética en la que una persona tiene dos recipientes con un fluido no newtoniano. Uno de ellos, tiene un comportamiento dilatante; por el contrario, el otro presenta un carácter pseudoplástico. Si dicha persona empezase a remover sendos materiales observaría que el caso último, el pseudoplástico, empezaría a volverse cada vez menos viscoso, asemejándose al comportamiento que tiene el agua, es decir, un comportamiento con más fluidez. De forma análoga, si hiciese la misma operación en la sustancia dilatante, esta se caracterizaría por asemejarse más al comportamiento que presentaría un sólido, especialmente si los movimientos al removerla fuesen rápidos.

Tras este razonamiento, es importante destacar que la solución planteada para protecciones contra armas de fuego usando fluidos no newtonianos está basada en el comportamiento dilatante.

1.7.2. Comportamiento lineal de la viscosidad.

Para comenzar, y tal y como se ha explicado en el epígrafe anterior, una relación lineal entre la viscosidad y la tensión tangencial, o cortante, significa que el fluido del que se está haciendo referencia no es otro que uno newtoniano y que, por tanto, se considera que la viscosidad es dependiente de manera única con la temperatura y la presión.

En el apartado 1.6.3. *Cálculo tensional*, se obtuvo que la tensión que discurre por la superficie de una bala de 9 milímetros es de 0,487 MPa. Gracias a la Ley de Newton (véase Ecuación 6), se puede relacionar el espesor del material fluido con las velocidades y tensiones cortantes que presenta dicho proyectil para que, de esta manera, se pueda calcular qué valor tiene la viscosidad dinámica en el caso planteado:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \Rightarrow \mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{0,487 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{407,1 \text{ m/s}} = \mathbf{119,63 \text{ Pa} \cdot s}$$

Se ha tomado como valor de espesor la mitad de 200 milímetros al considerarse que el impacto sucede en el punto medio del plano sombreado (véase Figura 18). Asimismo, es importante destacar la cantidad de viscosidad obtenida, pues supera en varios órdenes de magnitud a los valores habituales para fluidos newtonianos; por ejemplo, el valor viscoso del



agua de mar a unos 15 °C y a la presión atmosférica es de: $1,20 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Sin embargo, para el aire seco a 20 °C y a esa misma presión, se corresponde con: $18,19 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. [28]. Ante estos datos, se hace notoria la tremenda diferencia de viscosidades, llegando a ser de millones de veces en el orden de magnitud.

Físicamente, este parámetro tan elevado es indicativo de la enorme cantidad de resistencia que deberían oponer las capas fluidas del material para poder ser capaces de detener el proyectil. Resulta algo lógico, por lo tanto, darse cuenta de que el caso planteado para un fluido con relación lineal de comportamiento es erróneo. No obstante, aunque incorrecto, resulta útil para comprobar numéricamente el gradiente viscoso que puede llegar a producirse en un fluido no newtoniano cuando se comporta como un sólido al oponerse a una alta velocidad de deformación.

Para acabar, es preciso señalar que ante la variación de calibres propuestos en los ensayos de la normativa NIJ 0101.06, se han obtenido el resto de viscosidades (según comportamiento lineal) para cada uno de ellos en el apartado de *CÁLCULOS*., en el epígrafe: *0. Destaca de entre todos los valores tensionales*, el correspondiente para el calibre de 0,357 Magnum, el cual resulta ser más de dos veces la tensión más grande de la tabla (2,083 MPa para las protecciones de tipo IV). Dicha magnitud de fuerza por unidad de superficie es la apropiada para las defensas más resistentes que recoge la normativa utilizada; ergo, cabe pensar que la tensión cortante de 4,433 MPa sea un valor atípico. La explicación de este valor tan dispar es que la información superficial para este calibre es limitada y, por ello, presenta el área más pequeña de entre todas las balas estudiadas. Matemáticamente, al reducir el denominador en un cociente, se consigue aumentar el valor del resultado total; como consecuencia, se aprecia este aumento en el valor de la tensión tangencial para el calibre de 0,357 Magnum.

Valores de viscosidad ante un comportamiento lineal.

Por último, y de forma anticipada, determinar una protección viscosa completa basada en un fluido dilatante, supone recopilar más información sobre el comportamiento no lineal del



mismo. Dicha información se ha recopilado en el epígrafe: 1.8. *INVESTIGACIONES PREVIAS*.

1.7.3. Otras aplicaciones de fluidos no newtonianos.

Al explicar un concepto por primera vez suele ser harto recomendable que este vaya acompañado de un ejemplo visual que permita un mejor entendimiento. La definición de fluido (véase 1.7.1 *Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos*.) no es una excepción a este pensamiento, por lo tanto, en este epígrafe se va a proceder a analizar diferentes aplicaciones de estos materiales; concretamente, para aquellos fluidos que no mantienen una misma viscosidad constante (véase *Figura 22*).

Para comenzar, es importante hacer una distinción entre los materiales fluidos que son creados artificialmente y aquellos que se encuentran en la propia naturaleza. Las enumeraciones que se presentan a continuación tienen como objetivo revelar la inmensa cantidad de fluidos no newtonianos que tienen un papel en el día a día del ser humano. [20]

Por un lado, los fluidos fabricados por el ser humano tienen multitud de campos de aplicación y cada uno con un comportamiento característico. Algunos de ellos son:

- Productos cosméticos como cremas, champús o pasta dental.
- Materiales constructivos como el cemento, el hormigón, el asfalto o el lodo bentonítico.
- Industria alimenticia. Se incluyen todo tipo de productos lácteos (yogures, quesos, helados, etcétera); así como la miel, entre otros.
- Lubricantes y grasas para elementos mecánicos (véase *Figura 23* **Error! Reference source not found.**).
- Materiales para combatir fuegos e incendios.

Por otro lado, aquellos que se pueden localizar en la naturaleza en su estado primigenio son:

- Materiales biológicos como la sangre, la saliva o el líquido sinovial.
- Terrenos con cierta cantidad de agua.
- Petróleo crudo.
- Magma o lava terrestre (véase *Figura 24*).
- Aguas residuales (también denominadas aguas negras).



Figura 23. Lubricación de un engranaje de tornillo sin fin. Apréciase de la viscosidad del mismo. [21]



Figura 24. Corriente de lava provocada por la erupción del volcán Fagradalsfjall cerca de la capital islandesa en marzo de 2021. [22]

Los fluidos no newtonianos dilatantes tienen un comportamiento de sólido cuando se les deforma a velocidades altas, pero se comportan como un líquido cuando esa velocidad de deformación es baja (véase 1.7.1 Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos.). Esta condición es aprovechada por la Dirección General de Tráfico (DGT) en su Badén Inteligente de Velocidad (véase Figura 25) o BIV por sus siglas. Este elemento ha sido diseñado por Jose Antonio Aguilera y ha recibido múltiples premios nacionales e internacionales. Su funcionamiento se basa en una capa externa que almacena el fluido y lo protege frente al paso de vehículos y personas. Dicho fluido está fabricado para que aquellos automóviles que superen la velocidad de 30 kilómetros por hora (Km/h) experimenten la sensación de



atravesar un resalto convencional (aunque esta velocidad puede sufrir variaciones en función del emplazamiento del mismo); mientras que, para aquellos conductores que respeten los límites establecidos no sufran ninguna consecuencia, tanto en ellos mismos como en sus coches. Adicionalmente, su inventor asegura que está fabricado con materiales que respetan el medio ambiente y que genera menos contaminación de dióxido de carbono (CO_2) y de ruido en poblado. [23]



Figura 25. Badén Inteligente de Velocidad (BIV) frente al paso de un autobús urbano en Madrid. Esta imagen es propiedad de: Revista Tráfico y Seguridad Vial – DGT. [23]

La aplicación anterior pertenece a aquel grupo en el que el uso de fluidos es totalmente artificial, es decir, que está creada y diseñada en su totalidad para satisfacer una necesidad humana. Sin embargo y para acabar, también se ha mencionado que el estudio de los mismos puede utilizarse para comprender mejor ciertos fenómenos naturales como es el caso de los desplazamientos de tierra. En este sentido, se ha llevado a cabo un modelo matemático simulable por el cual se puede predecir la sedimentación en diferentes regímenes fluidos. Este desarrollo ha sido realizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT según sus siglas en inglés) a través de dos investigadores Aaron S. Baumgarten y Ken Kamrin. En su artículo, mediante la utilización de las ecuaciones constitutivas y la asignación de los valores adecuados a las variables necesarias, se ha llegado a la conclusión de que la solución planteada es aceptable y que se aproxima adecuadamente a otros estudios de la misma naturaleza, lo que ha permitido realizar comprobaciones como las de la imagen inferior (*Figura 26*). En dicha ilustración se hace notoria la diferencia cuando un cuerpo se encuentra al borde de una inclinación de terreno seco con respecto a cuando esa misma masa de tierra presenta una cantidad de agua. En este último caso, el objeto se desplaza un 20 % más en la dirección del eje de abscisas (eje x) y un 36 % más en el de ordenadas (eje y); no obstante,



la rotación del mismo es de un 34 % menos con respecto a la situación con terreno sin humedad. [34]

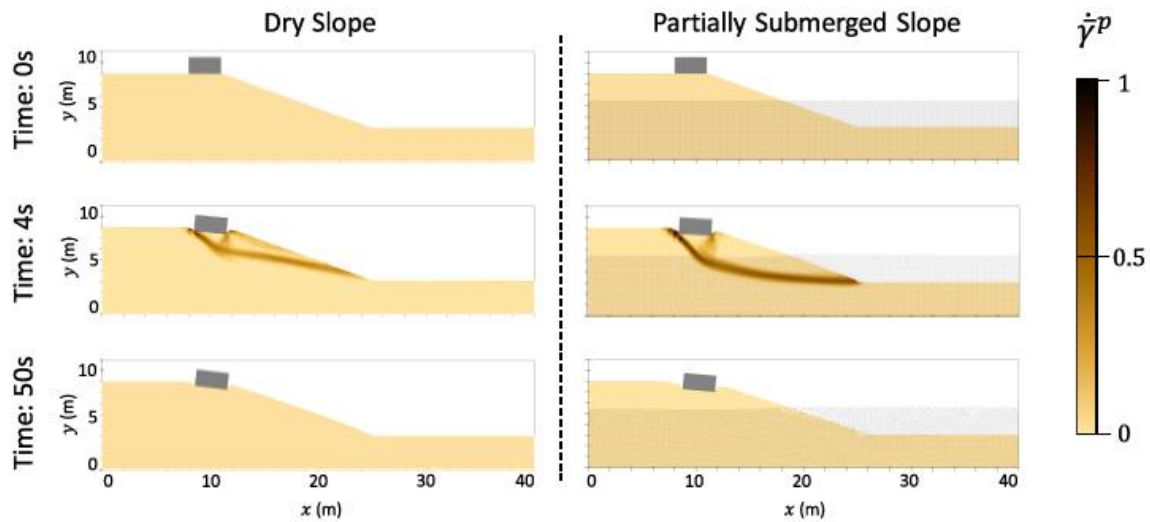


Figura 26. Serie de imágenes tomadas del modelo simulado que contrastan las diferencias entre un cuerpo sometido a una pendiente en un terreno seco y un terreno con una determinada humedad. [34]

La variable situada en el margen derecho, $\dot{\gamma}^p$, corresponde con el gradiente de velocidad a cada altura de una masa fluida: $\frac{du}{dy}$; el cual, está definido para una presión concreta de valor p . [34]

1.8. INVESTIGACIONES PREVIAS.

Dos son los estudios que se han contemplado para la redacción de este apartado, los cuales han sido desarrollados por la Universidad de Chicago y, aunque guardan muchas similitudes, su principal diferencia es la manera de generar los impactos. Para poder realizar una comparación más detallada y clara de ambas investigaciones, se han dividido en una serie de aspectos relevantes, siendo:

- Fluido empleado y sus propiedades.
- Configuración del experimento.
- Resultados y conclusiones destacables.



Adicionalmente y antes de comenzar con el análisis de sendas investigaciones, se ha incluido un apartado previo para remarcar los diferentes comportamientos que puede experimentar un fluido a lo largo de su movimiento según qué condiciones.

1.8.1. Regímenes para un fluido en movimiento.

Estudiar un fluido en movimiento supone averiguar cómo se desplazan las partículas que lo componen. Para responder a dicha pregunta es necesario determinar dos parámetros fundamentales: la velocidad y la viscosidad que presenta el fluido. En función de ellos se distinguen dos tipos de movimiento (también denominados flujo): laminar y turbulento.

Por un lado, el flujo laminar corresponde con un movimiento ordenado dividido en capas fluidas entre las que no existe ningún tipo de mezcla y en las que la viscosidad es predominante (véase Figura 27).

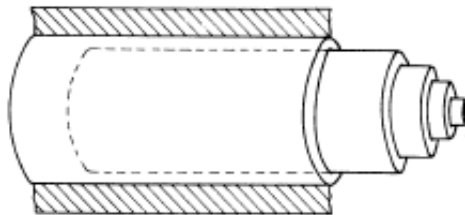


Figura 27. Representación del movimiento de un fluido en régimen laminar por el interior de una tubería. Apréciase las capas concéntricas del fluido. [28]

Por otro lado, un movimiento turbulento se presenta caótico en su conjunto, en el que cada partícula sigue una propia línea de corriente que se entrecruza con sus semejantes de forma anárquica (véase Figura 28).

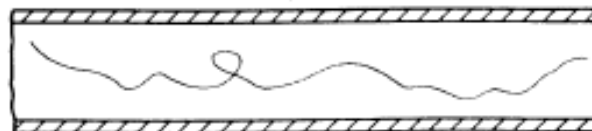


Figura 28. Línea de corriente de una partícula fluida en régimen turbulento. Se aprecia que su movimiento es totalmente aleatorio. [28]



Que un fluido presente cualquiera de los dos tipos de movimiento depende de un parámetro adimensional conocido como el número de Reynolds (véase Ecuación 7):

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}}$$

Ecuación 7. Número de Reynolds.

Este cociente mide la influencia que tiene la viscosidad en un fluido en movimiento; de tal manera que si ese número es pequeño, entonces, el efecto que tiene la viscosidad es considerable, y al contrario. Por lo tanto, el flujo laminar se caracteriza por presentar números de Reynolds pequeños; mientras que, el flujo turbulento está caracterizado por valores grandes de dicho parámetro. [28]

1.8.2. Estudio con impactos generados mediante energía potencial.

La realización de esta investigación es debida al trabajo desarrollado por Scott R. Waitukaitis y Heinrich M. Jaeger. [35]

Fluido empleado y sus propiedades.

La accesibilidad de los elementos que componen la mezcla fue determinante en la elección para que el fluido a utilizar fuese no newtoniano de carácter dilatante. Este se consiguió mediante harina de fécula de maíz (maicena) mezclada con agua, aunque según los propios investigadores, el comportamiento de otros fluidos de la misma naturaleza sería similar al que presentó el descrito.

Cabe mencionar que la fracción en volumen de las partículas con respecto al del sistema completo es muy determinante en el comportamiento frente a impactos. Se logró una mejora de, aproximadamente, dos veces al variar este valor de un 46 % a un 52 %. Asimismo, se utilizó agua combinada con glicerina ($C_3H_8O_3$) para generar una mezcla que incrementaba la viscosidad de la primera sustancia unas diez veces. En ambos casos, la adición de estos elementos no generó ningún cambio en la respuesta temporal del fluido al percibir el impacto, sino que lo mejoró en valores de penetración, tanto durante el propio impacto, como en el proceso de hundimiento del cuerpo tras haber sido detenido por el fluido.

Configuración del experimento.



La disposición de los diferentes elementos que componen este ensayo está resumidamente ilustrada en la imagen inferior (*Figura 29*).

Estudios anteriores, en los que se basaron los investigadores mencionados, indicaron que la porción de fluido que se rigidiza ante la presencia de un impacto, transmite tensiones a través de sí mismo hasta los límites del contenedor que lo alberga. Se utilizó un volumen de 25 litros para poder realizar mediciones más fiables; de esta manera, los datos tomados estaban bien diferenciados según las zonas a las que pertenecía cada uno de ellos. Frente a esta cantidad de material se dio uso a una varilla cilíndrica de aluminio de 0,368 kilogramos (Kg) de masa y 0,93 centímetros (cm) de radio para ejercer como proyectil; este elemento era soltado desde una cierta altura o lanzado mediante bandas elásticas (*slingshot*) que permitían acelerarlo en mayor medida. En ambas ocasiones, se utilizaron guías (*guiderails*) para asegurar que la superficie libre del fluido y la cara circular de la varilla fuesen las correctas. Adicionalmente, se incorporó a la barra metálica un acelerómetro para poder registrar cada uno de sus valores de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Por otro lado, para comprobar la transmisibilidad de la fase de comportamiento sólido, se incluyó un sensor de fuerza en el fondo del contenedor que albergaba el fluido y poder medir este fenómeno. Asimismo, se utilizó una cámara de alta velocidad, *Phantom V9.1*, que permite la captación de 10000 fotogramas cada segundo y la cual tuvo el apoyo de un marcador laser que estaba dirigido hacia la superficie libre del fluido; las imágenes obtenidas de este instrumento sufrieron un análisis por medio de velocimetría de imágenes de partículas o PIV, por sus siglas en inglés. Con ambos instrumentos se pudo relacionar: la variación de profundidad en cada instante y a lo largo de la longitud diametral de la varilla, así como las velocidades instantáneas del campo fluido.

Para acabar, se utilizó una cámara de rayos X en el seno del fluido para ver internamente cómo era su comportamiento.

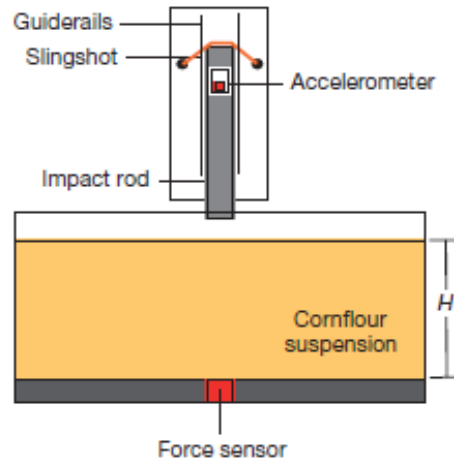


Figura 29. Esquema ilustrativo del experimento que se basa en la utilización de la energía potencial gravitatoria y la energía potencial elástica. [35]

Resultados y conclusiones destacables.

En primera instancia y en la imagen inferior (*Figura 30*), se muestran los resultados de aceleración (a_{rod}), velocidad (v_{rod}) y desplazamiento vertical (z_{rod}) de la varilla captados por el acelerómetro. La velocidad inicial del cuerpo en el momento del impacto era de $1,18 \text{ m/s}$. Puede observarse que en el instante en el que la aceleración empieza a decaer, las otras dos magnitudes la siguen, hasta llegar al tramo medio del eje de abscisas en el que la velocidad alcanza un tramo constante; siendo indicativo del ligero hundimiento del cuerpo en el fluido, también reflejado en el crecimiento de la penetración en la última gráfica con una pendiente mucho más reducida. Es importante destacar que todas estas variaciones suceden en un intervalo de tiempo medido en milisegundos (ms); algo imperceptible al ojo humano.

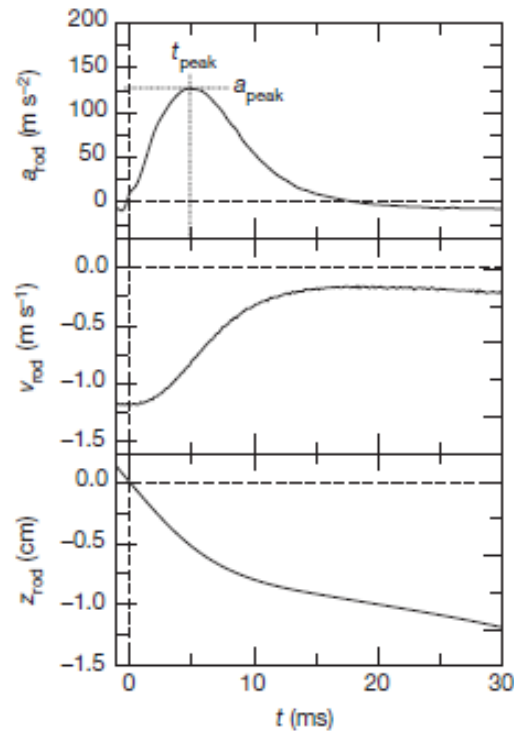


Figura 30. Variación de aceleración, velocidad y penetración de la varilla a lo largo del proceso de impacto para una velocidad inicial de $1,18 m/s$. [35]

Para poder entender bien cómo es la relación entre el frente de solidificación, los límites de contorno del contenedor y el resto de fluido alejado de la zona de impacto, se generaron diversas pruebas en las que se iba modificando la altura de la mezcla fluida (parámetro H en Figura 29) y en las que se midieron las fuerzas que le llegaban al sensor situado en el fondo del armazón (véase Figura 31) en relación con los cambios de aceleración. La medida de la fuerza estaba determinada por el parámetro F_b (dibujado en rojo en la imagen posterior), mientras que la velocidad de la varilla al alcanzar la superficie libre de la mezcla se fijó en: $0,49 \pm 0,04 m/s$.

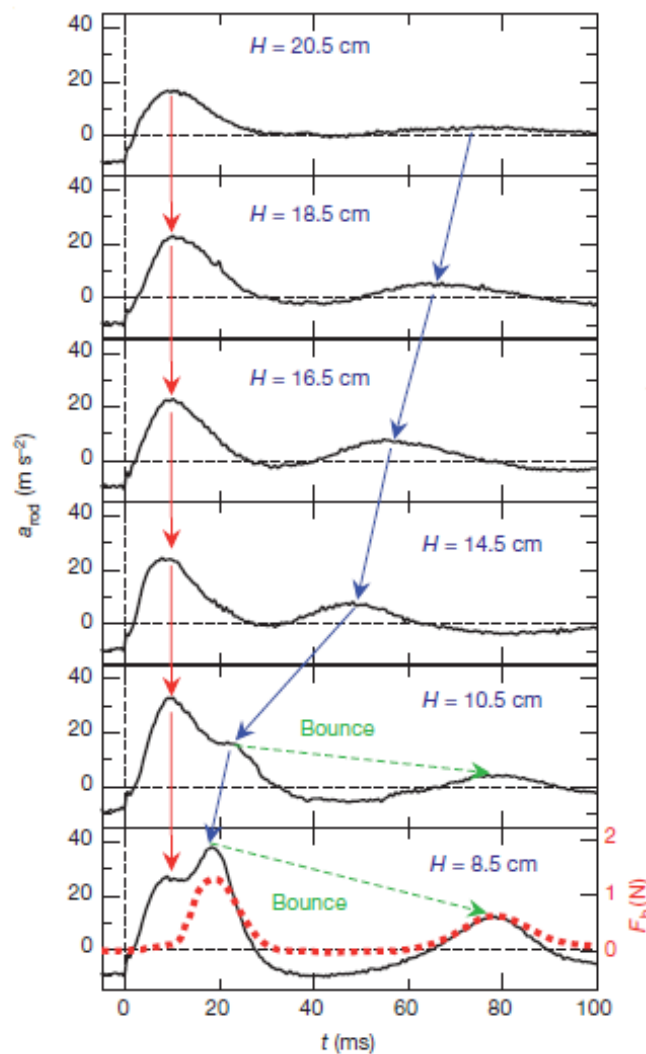


Figura 31. Relaciones graficas entre la aceleración de la varilla de aluminio con el tiempo y la fuerza que alcanza el fondo del depósito (línea roja discontinua). [35]

Observando la imagen superior se puede comprobar que el impacto de la varilla metálica sucede en el instante de 10 ms para el cual, ocurre el primer pico en las gráficas; siendo este debido, completamente, al efecto de la viscosidad y, por tanto, a la primera rigidización del fluido, tal y como puede distinguirse en la presencia de un valor constante e independiente del volumen total para ese tiempo exacto. Sin embargo, según disminuye la altura de mezcla y por consiguiente: volumen fluido; empiezan a surgir dos picos más de desaceleración. Este fenómeno, es especialmente apreciable en la última gráfica donde, además, se observa que el sensor detecta valores de entre 1 y 2 newton (N) como resultado de la transmisión de tensiones hasta el fondo del recipiente.



Las conclusiones que pueden obtenerse de esta serie de ensayos son que el proceso de transmisión de la fase con comportamiento sólido no es instantáneo y que, ese frente recorre el seno del fluido rigidizándolo a su paso hasta que: o bien detiene el cuerpo, o bien alcanza los límites del depósito. En ambas situaciones, el frente vuelve hacia el epicentro donde se generó el impacto. Debido a que esa cantidad de material presenta un comportamiento similar a un sólido es capaz de almacenar energía y tensión, algo que resulta observable en los picos de aceleración según se va eliminando cantidad de mezcla, es decir: reduciendo la altura H . Cuando la varilla impacta al fluido en la primera situación ($H = 20,5$ cm), esta es detenida sin apenas sufrir un rebote, ya que el fluido tiene el suficiente volumen para lograrlo mediante su rigidización mínima, comportándose así como un sólido elástico al ser capaz de deformarse en mayor medida, es decir, disipando energía. Por el contrario, cuando la altura H es de valor 8,5 cm, detener el cuerpo supone alcanzar los límites de contorno porque no existe material suficiente para conseguirlo; por lo tanto, existe un mayor grado de rigidez y la varilla sufre un rebote más pronunciado, el cual es motivado porque el fluido no es capaz de absorber tanta energía (se deforma menos que en el caso anterior) y la devuelve. Tras este primer retroceso por parte del cuerpo impactante, dicho elemento vuelve a chocar contra el fluido, lo que supone un segundo impacto. Esta tesitura se repite hasta que la velocidad del cuerpo es la correspondiente para que no ocurra ningún impacto y la varilla se hunda en la mezcla, o lo que es lo mismo: que el fluido se comporte como tal.

De manera adicional, se debe tener en cuenta el concepto de masa añadida (véase 2.1.4 *Concepto de masa añadida en la investigación con impactos generados mediante energía potencial*.) en la interacción entre la fase rigidizada del fluido y la que está alrededor de la misma. Este fenómeno explica la cantidad y el valor de fuerzas inerciales que son ejercidas sobre un cuerpo debido a las aceleraciones que este presenta al desplazarse en el seno de un fluido. En el experimento expuesto, se manifiesta en la cantidad de partículas fluidas que arrastra la varilla y el frente de comportamiento sólido en su movimiento que, aunque ambos individualmente no supondrían una diferencia apreciable, superponiéndolas sí es un efecto a tener en cuenta y que puede resultar beneficioso o perjudicial en función del grado de este (véase *Figura 32*).

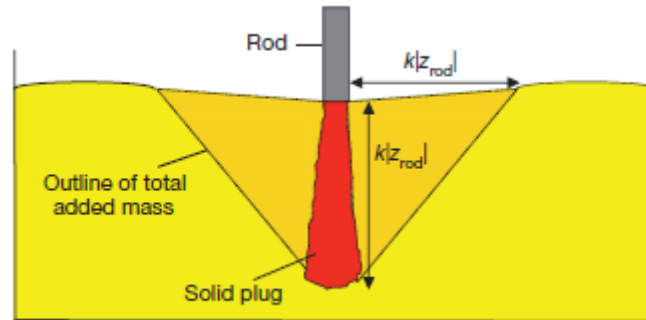


Figura 32. Representación de las diferentes zonas volumétricas del fluido. En rojo, la parte rígida (apréciese que tiene una geometría troncocónica); en amarillo, el fluido que permanece invariable; y en naranja, la zona intermedia entre las anteriores, la cual es la relacionada con el efecto de masa añadida. [35]

Por otro lado, al graficar la altura que debe recorrer la fase rigidizada del fluido hasta el fondo del recipiente que lo contiene (h_{front}) con respecto a la penetración de la varilla (h_{rod}), los investigadores se dieron cuenta de que existe una relación de carácter lineal entre ambos, siendo:

$$h_{front} = k \cdot h_{rod}$$

Ecuación 8. Relación lineal entre la penetración del cuerpo impactante con la que debe recorrer la fase rígida.

Donde $k = 12,2 \pm 0,01$; lo que establece que la propagación de la fase de comportamiento sólido está directamente condicionada por la velocidad de la varilla metálica gracias a la relación de desplazamiento y velocidad, con lo cual:

$$v_{front} = k \cdot v_{rod}$$

Ecuación 9. Relación lineal entre las velocidades de rigidización del fluido con la del cuerpo impactante.

Esta constante adimensional está representada en la imagen superior (Figura 32) y el método de captación de esta información fue mediante el acelerómetro situado en la varilla de aluminio. No obstante, en la ilustración posterior (Figura 33), se muestran los valores medios de los datos captados mediante la toma de imágenes de rayos X y PIV. Resulta evidente que en la zona coloreada de tonos más cálidos es donde se producen las mayores deformaciones. Se observó, de forma análoga a Ecuación 8 y a Ecuación 9, que la variación de desplazamientos verticales de la fase rigidizada junto con la de la varilla estaban relacionadas linealmente por una constante de valor $k = 13,1 \pm 0,9$; muy similar al obtenido mediante acelerometría (véase 2.1.3. Desarrollo de cálculos en la investigación con impactos generados mediante energía potencial.)).

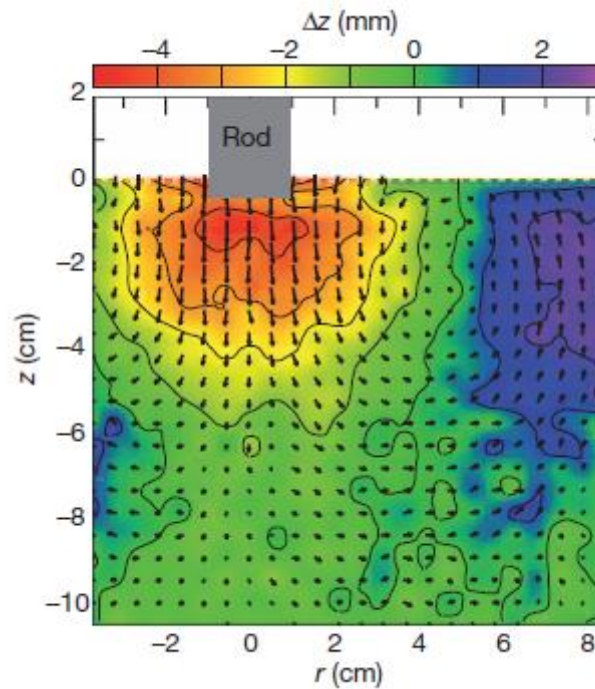


Figura 33. Representación de la información recopilada mediante velocimetría de imágenes de rayos X. Apréciase que las líneas negras se corresponden con los vectores de desplazamiento en dichos puntos. [35]

Por último, cabe destacar que para contrastar que las mediciones tomadas eran correctas, se hizo uso de un modelo matemático que reprodujera la situación experimental, tal y como se ve en Figura 34. En dicha imagen se puede observar la tremenda similitud entre los valores recogidos prácticamente y los simulados, con lo que se puede asegurar que los resultados obtenidos eran correctos. La línea roja se corresponde con una velocidad de impacto de $1,50 \text{ m/s}$; el caso naranja $1,18 \text{ m/s}$; el color verde se relaciona con $0,96 \text{ m/s}$; el azul con $0,63 \text{ m/s}$ y, por último, el morado con $0,28 \text{ m/s}$.

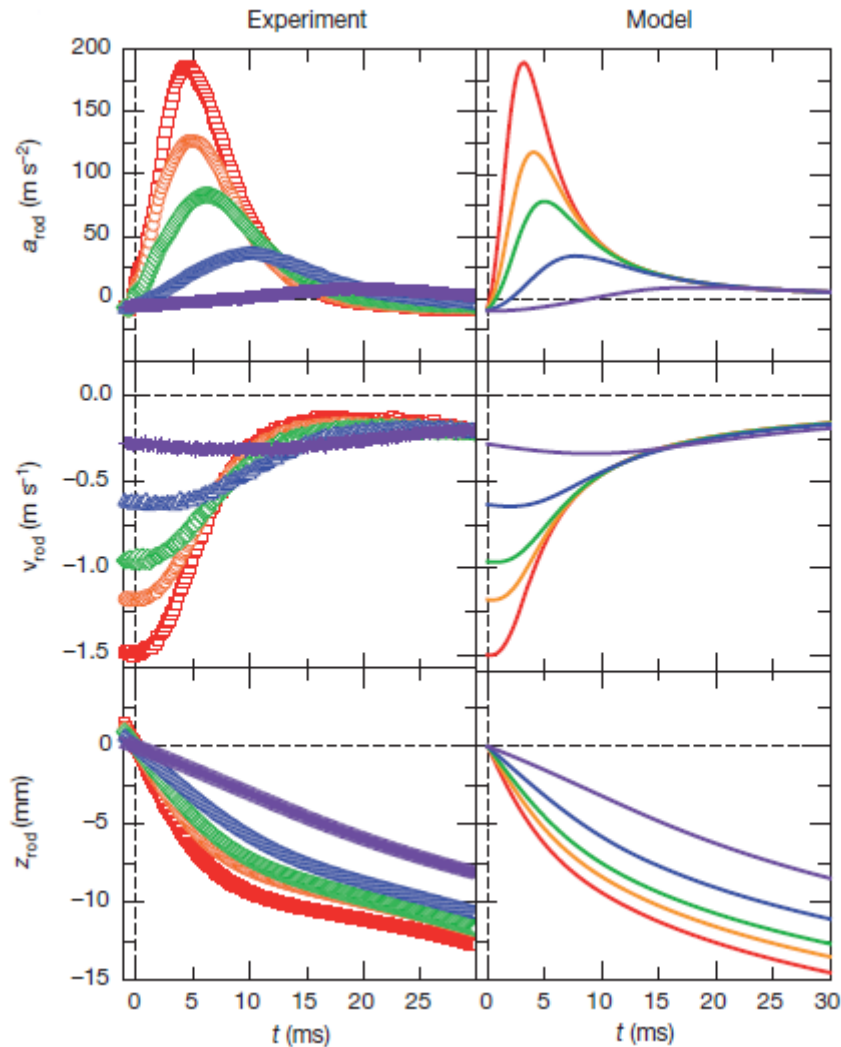


Figura 34. Comparación entre valores de aceleración, velocidad y desplazamiento de la varilla metálica medidos en la experimentación y calculados según un modelo matemático. [35]

1.8.3. Estudio con impactos generados neumáticamente.

El desarrollo de este estudio se llevó a cabo gracias a Ivo R. Peters y a Heinrich M. Jaeger; este último también fue uno de los investigadores en la caracterización del comportamiento de un fluido dilatante descrito en el párrafo inmediatamente anterior (véase apartado 1.8.2. *Estudio con impactos generados mediante energía potencial.*). [36]

Fluido empleado y sus propiedades.

Al igual que ocurría en la investigación basada en la energía potencial, el hecho de que los componentes de la mezcla fuesen accesibles resultó determinante a la hora de escogerlos.



De esta manera, el fluido utilizado consistió en el mismo que en el descrito en el apartado anterior, es decir, harina de fécula de maíz combinada con agua y glicerina, con la excepción de que en este caso, adicionalmente se diluyó cloruro de cesio (CsCl) en el conjunto. Este compuesto permitió que las densidades de los elementos se combinaran de forma más homogénea, resultando en una mezcla más uniforme sin afectar al rendimiento en penetración. El valor final de densidad era de: $1580 \pm 20 \text{ Kg/m}^3$.

Es importante destacar que en este experimento se estudió el efecto de la humedad en la mezcla conjunto mediante la variación del valor k , según la *Ecuación 9*. El fluido fue sometido a ambientes de 0,1 % y 80 % de humedad relativa para los que el parámetro presentó el valor de $9,9 \pm 0,4$ y $6,6 \pm 0,2$; respectivamente. A modo de recordatorio, se indica que el coeficiente k tiene una naturaleza adimensional y sus variaciones demuestran que la humedad sí tiene un efecto en la mezcla a tener en cuenta.

En cuanto a la fracción volumétrica de las partículas se mantuvo en una cantidad del 46 %.

Configuración del experimento.

Para generar los impactos se usó un pistón neumático de doble efecto (*SCN5*, del fabricante *Dyadic Systems*) para suplir el mismo objetivo que en el ensayo con energía potencial. Las mediciones de los valores deseados se llevaron a cabo mediante un acelerómetro (*DLC101*, producido por *Omega*) y una cámara de alta velocidad (*Phantom V12*); con este último instrumento, también se utilizó un análisis PIV para obtener el campo de velocidades instantáneas del fluido.

La disposición de los elementos mencionados (a excepción de la cámara fotográfica) se puede observar en la imagen inferior (*Figura 35*), donde es preciso destacar que el fluido no newtoniano se encontraba suspendido en *Fluorinert*™ (FC-3283) [37], un líquido con gran estabilidad térmica y química; la densidad y viscosidad dinámica de este compuesto tenían un valor de: 1820 Kg/m^3 y $1,365 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$, respectivamente. Esta variación con respecto a la experimentación anterior tuvo como fin eliminar las tensiones generadas en los límites de contorno como consecuencia de la rigidización del fluido. Se comprobó empíricamente que los errores que se introdujeron por la adición de esta sustancia entraban dentro del margen de ruido admisible, que los investigadores delimitaron en un 5 %.

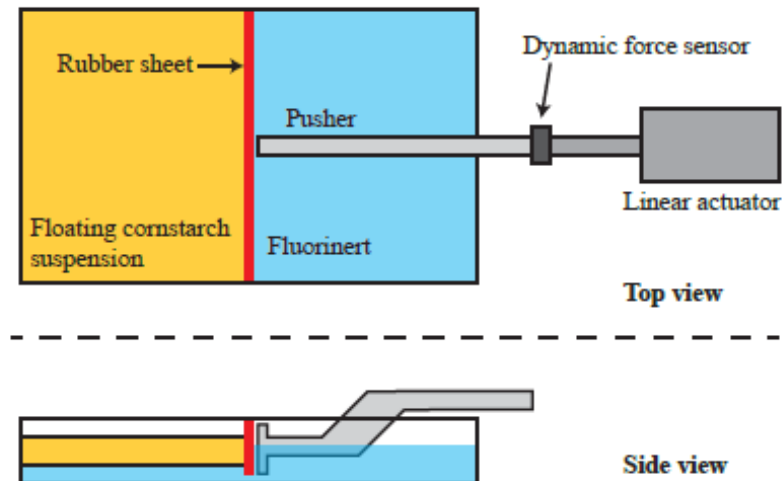


Figura 35. Vistas esquemáticas superior y lateral de la configuración del experimento que hace uso de un cilindro neumático como generador de impactos. [36]

Por último, cabe destacar que el contenedor de la ilustración superior tenía como dimensiones: 30 x 20 x 5, con unidades dadas en centímetros. Asimismo, la cabeza del vástago no impactaba directamente sobre la superficie libre del fluido, como sucedía en el epígrafe anterior, sino que lo hacía sobre una lámina de silicona de 0,13 mm de espesor (representado como la línea roja en la *Figura 35*) y esta es la que transmitía el choque al propio fluido.

Resultados y conclusiones destacables.

La principal ventaja de utilizar un cilindro de doble efecto que golpee sobre la superficie libre del fluido es que se podía controlar de una manera mucho más precisa la velocidad a la que se producía el impacto. Bajo esta premisa, los investigadores delimitaron dicha velocidad a un valor de: $u_p = 0,375 \pm 0,007 \text{ m/s}$ y, mediante velocimetría, se observó el comportamiento del fluido en el que la velocidad de cada partícula se denominó como: u . De esta manera, el gradiente pudo asociarse a un rango de colores (véase *Figura 36*).

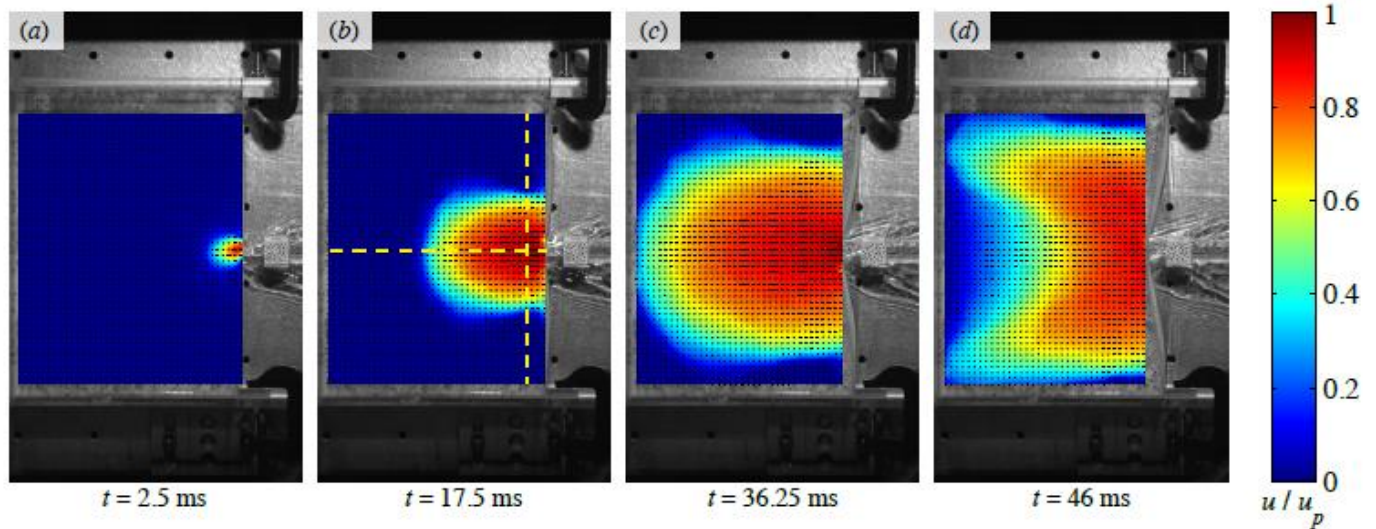


Figura 36. Gradiente de velocidades asociado a una gama cromática para observar la rigidización del material. Apréciase que el cambio del caso c.) al caso d.) es debido a que la rigidización ya ha alcanzado los límites de contorno del sistema.

En la imagen superior, se puede observar en tonos rojizos y anaranjados las regiones donde se transmitió una mayor parte de la energía del impacto (a través de la energía cinética principalmente); mientras que, los colores más fríos representan aquellas zonas donde no existía una transmisión tan fuerte. Es preciso destacar que dicho crecimiento ocurría en la dirección longitudinal (siguiendo el vástago del pistón) y en la dirección transversal (perpendicular a esta última en el plano); en ambas direcciones, el gradiente de velocidades en el seno del fluido se delimitó a un valor de: $u/u_p = 0,5$ para que pudieran diferenciarse las partículas que se encontraban estáticas de aquellas que estaban en movimiento. Así pudo obtenerse el perfil de velocidades para cada instante de tiempo, el cual sufre variaciones en función de si la solidificación de la mezcla sucede en el caso longitudinal o en el caso transversal.

Por un lado, la dirección axial con el pistón neumático presenta un perfil como el de la ilustración inferior (Figura 37) para un instante de tiempo dado: 17,5 ms; en el que pueden observarse tres zonas bien diferenciadas dependiendo de la distancia con la punta del vástago, o dicho de otra forma: con el epicentro del impacto. Estudiándolo de izquierda a derecha, se observa que más allá de 0,08 metros no existe todavía movimiento de las partículas y que por tanto se asociaría con un color azulado de la Figura 36. En la zona central, comprendida entre los 0,08 y los 0,05 metros de distancia, existe un gradiente de velocidades que se corresponde con la región de expansión de la fase rigidizada. Asimismo, esta parte



del fluido hace de enlace y de término medio entre las partículas estáticas (las más alejadas del impacto) y las móviles (las más cercanas al impacto, valor de x menor a los 0,05 m).

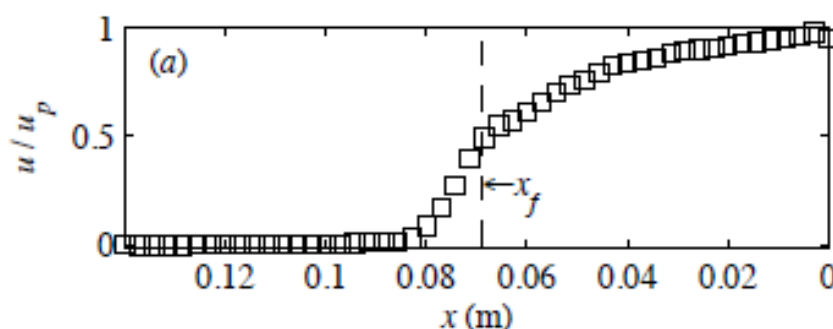


Figura 37. Perfil de velocidades longitudinal para el instante 17,5 ms en el fluido no newtoniano con un pistón neumático como simulador de impactos. El valor de x_f se corresponde con el valor más alto de la pendiente.

Por otro lado, el perfil de velocidades en la dirección transversal y para el mismo instante de tiempo que el caso anterior presenta una geometría distinta, ya que se puede desplazar en dos sentidos opuestos 180 grados (véase Figura 38).

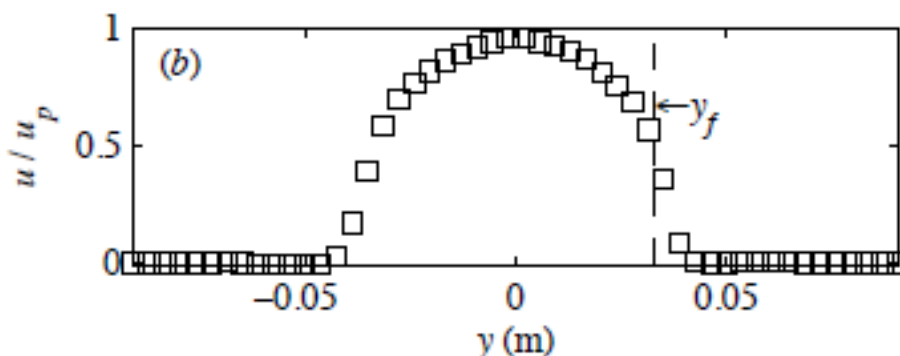


Figura 38. Perfil de velocidades transversal para el instante de tiempo de 17,5 ms en el fluido después de generar un impacto con un vástago neumático. La línea discontinua de y_f marca el punto donde la pendiente es más grande.

Tal y como puede apreciarse en la imagen superior y en el caso b.) de la Figura 36, el sentido de propagación de la velocidad y, con lo cual, de la rigidización del material no es condicionante de la transmisión de dicho frente, puesto que en ambos sentidos se desplaza de igual manera; se comprobó empíricamente: a diferentes distancias la variación de la velocidad entre los dos sentidos era menor del 1 %.

Al igual que como ocurre en la dirección longitudinal, existen tres regiones distinguibles por el gradiente de velocidades. En la primera de ellas ($y \geq 0,05$ m), dicha variable es nula debido



a que no existe movimiento todavía. La segunda de las regiones ($0,05 > y > 0 \text{ m}$) corresponde con el gradiente más grande, el cual se relaciona con la rigidización del fluido. La última de estas zonas ($y = 0 \text{ m}$) se relaciona con aquella en la que las partículas siguen aproximadamente el movimiento impelido por el pistón.

Gracias al equipo del que disponían los investigadores, se pudo medir la velocidad a la que se propagaban los frentes longitudinal y transversal. Para el caso descrito resultó en unos valores de: $2,83 \text{ m/s}$ y $1,52 \text{ m/s}$, respectivamente; no obstante, se llevaron a cabo más ensayos con ligeras variaciones en la composición, la humedad, la velocidad de impacto, etcétera. Se observó que el ratio entre dichas velocidades oscilaba entre 1,7 y 2,7; aunque llegaron a la conclusión de que los valores más habituales eran de: $2,01 \pm 0,03$. Esto quiere decir que la velocidad del frente en la dirección longitudinal es el doble que la velocidad en la dirección transversal.

En este estudio no era necesario que el fluido detuviese el cuerpo impactante, a diferencia de cómo ocurría en el anterior, en el que los impactos eran generados mediante energía potencial (véase *apartado 1.8.2.*). El hecho de que el pistón haga la fuerza y se retire por sí mismo permite que se pueda estudiar el fluido más aisladamente, sin que se produzca un hundimiento cuando la velocidad de cuerpo es la adecuada. De esta forma, se pudo comprobar que la anchura de la región del fluido existente entre la fase con comportamiento sólido y la fase con comportamiento líquido era de 2 cm.

En la primera experimentación analizada (véase *apartado 1.8.2.*), para comprobar el valor de las tensiones en el seno del fluido se situó un sensor en el fondo del recipiente que lo contenía; sin embargo, en el experimento descrito en este apartado no se hizo uso de dicho elemento. Por lo tanto, los investigadores tuvieron que analizar el gradiente de velocidades para corroborar el efecto que tenían estas tensiones. Se dieron cuenta de que en las zonas intermedias de las imágenes: *Figura 37* y *Figura 38* existe un gradiente mayor que en las regiones más próximas al vástago, lo que se debe a la presencia de unas tensiones de compresión que recorren la mezcla cuando se trata de la dirección longitudinal; estas tensiones de compresión se convierten en tensiones de naturaleza cortante cuando la dirección pasa a ser transversal. En ambas ocasiones, el gradiente refleja el cambio más rápido en la rigidización del material para la región intermedia.

Es interesante destacar que el crecimiento tensional que ocurre en el interior de la mezcla también puede explicarse mediante el concepto ya descrito de masa añadida; según por el cual las partículas que arrastra el vástago al generar el golpe comprimen en mayor medida el



fluido haciendo que, en este caso, sí resulte beneficioso puesto que hace que se rigidice más, logrando así que la penetración se vea comprometida.

Por último y en ambos casos, el efecto de estas tensiones certifica lo observado en el estudio anteriormente expuesto; es decir, que el fluido se rigidiza en mayor o menor medida para lograr detener el cuerpo impactante y las tensiones que provoca o, en su defecto, transmitir las a los límites de contorno. Independientemente de la situación, la fase de comportamiento sólido retorna al epicentro del impacto. El proceso se repite, es decir, que esta onda viaja continuamente a través del fluido hasta que el sistema vuelve a alcanzar el equilibrio y lo hace con una velocidad mucho mayor que la que presenta el impacto; por ejemplo: la velocidad del pistón neumático era de $0,375 \pm 0,007 \text{ m/s}$; mientras que, la onda de fase rigidizadora era de: $2,83 \text{ m/s}$ para la dirección longitudinal. Con lo cual, existe una amplificación entre ambas velocidades de casi ocho unidades.

1.8.4. Conclusiones de las investigaciones y su desarrollo como protecciones antiimpactos.

La naturaleza de los dos estudios analizados encaja a la perfección para con el objetivo del presente documento: comprobar si un fluido no newtoniano de carácter dilatante podría ser capaz de detener el impacto de un proyectil balístico.

De manera independiente de cómo se generaron los impactos en las investigaciones, se puede observar en ellos un factor común: la velocidad de dichos impactos. En el primero de los casos, la velocidad de la varilla de aluminio era de: $1,18 \text{ m/s}$; no obstante, para el segundo de ellos, la velocidad del vástago era de: $0,375 \text{ m/s}$. Existe una profunda diferencia entre estos valores con los típicos que presenta una bala: $407,1 \text{ m/s}$ para una del calibre 9 mm (el resto de valores de velocidad pueden encontrarse en la *Tabla 1*); por lo tanto, también podría extrapolarse esa diferencia de magnitud a una diferencia de comportamiento. Con el fin de asegurar empíricamente que esto no sucede, se ha planteado una solución experimental en la que pueda realizarse una investigación con balas reales y equipo adecuado para poder caracterizar en profundidad los fluidos no newtonianos dilatantes (véase 1.9. *SOLUCIÓN PROPUESTA*).

Cabe mencionar que de forma adicional al comportamiento en penetración del fluido, también existen otros fenómenos físicos que se deberían estudiar para caracterizar completamente el fluido estudiado.



La temperatura.

Se trata de una propiedad que condiciona directamente el nivel de viscosidad de cualquier fluido, ya que la viscosidad disminuye según aumenta la temperatura; por lo tanto, es de especial interés controlar su variabilidad.

Si durante un ensayo se disparase sobre una cierta cantidad de fluido dilatante con un arma de fuego, la temperatura que presentase el proyectil en el momento del impacto condicionaría el comportamiento en penetración del compuesto, empeorándolo. El proyectil lleva asociado una energía calorífica propia de la combustión espontánea de la pólvora en la cámara de ignición del arma; dicha energía se transfiere siguiendo el principio cero de la termodinámica, es decir: que la bala cede su calor al fluido (que se encuentra a una temperatura más baja) hasta que las temperaturas de ambos se igualan. Esta transferencia de energía en forma de calor cambia las propiedades y la respuesta del fluido no newtoniano.

Por último, es de especial interés controlar la temperatura que existe en el ambiente, ya que el calor puede hacer que se evapore el agua de la mezcla. En ese caso, la proporción ya no es la correcta y, con lo cual, su comportamiento tampoco; esto es aplicable especialmente para el caso de la mezcla de maicena y agua.

La humedad.

En la experimentación con impactos generados por un pistón neumático (véase apartado 1.8.3.) se comprobó el efecto de la humedad. Si se incrementa el valor de esta variable se reduce la velocidad del frente de rigidización; ergo se reduce el tiempo de respuesta ante un impacto, disminuyendo también así su capacidad de resistir altas velocidades de deformación.

El efecto de la humedad también puede explicarse según el hecho de que añadir agua al conjunto hace que la proporción de maicena y agua se desplace; por consiguiente, la mezcla se vuelve más fluida.

La rotación del proyectil.

Generalmente, todos los cañones de las armas de fuego presentan un estriado dentro del mismo que hace que el proyectil gire sobre su eje simétrico de revolución (véase Figura 17).



Esto hace que se mejoren las condiciones de vuelo de la bala por el efecto Magnus, incrementando la precisión y la aerodinámica.

Si un proyectil impactase sobre una porción de fluido, esta rotación podría hacer que las capas del mismo sufrieran una velocidad de deformación menor, haciendo que el fluido se opusiese menos a ser penetrado.

La geometría y el calibre del proyectil.

Una manera de clasificar las balas es a través de qué geometría y qué recubrimiento presenta la punta de la misma. La tecnología balística puede hacer que un proyectil amplifique la fuerza de su impacto o mejore su aerodinamismo, por ejemplo. De igual manera, el tamaño (calibre) y el peso del proyectil son otras dos variables que no se deben obviar en términos balísticos, pues configuran la mayor parte de la energía de dicho proyectil.

La distancia de impacto.

Esta variable está profundamente condicionada con la anterior, pues que un proyectil viaje una mayor o menor distancia depende de la cantidad de pólvora que se encuentra en el casquillo, cuyo tamaño y volumen están relacionados, a su vez, por el calibre y la geometría de la bala.

Resulta de interés destacar que cuanto mayor distancia recorra un proyectil, mayor es su energía de impacto, dado que se va acelerando cada vez más. Aunque esto solo ocurre en un rango concreto de metros, hasta que las fuerzas de naturaleza resistente superan a las de naturaleza impulsora y la bala comienza a perder energía.

La frecuencia y proximidad de los impactos.

Caracterizar el comportamiento frente a un impacto en un fluido no newtoniano supone una tarea ya de por sí compleja; sin embargo, si se incrementase la frecuencia de estos, es muy probable que el comportamiento del mismo fluido fuese muy diferente; algo motivado a que el compuesto necesitaría más tiempo para disipar la energía asociada a cada proyectil. De igual manera, en una superficie de fluido determinada, cuanto más próximos se encuentren los impactos mayor es la energía a disipar en esa zona para una misma cantidad de materia.



Por último, es preciso hacer mención de que en el documento, así como en las investigaciones analizadas en el mismo se ha tomado como único objeto de estudio la capacidad antiimpactos de un fluido no newtoniano dilatante; por consiguiente, se han obviado el resto de fenómenos físicos como los descritos debido al engrandecimiento en dificultad, presupuesto y campos de estudio que supondría incluirlos todos.

1.9. SOLUCIÓN PROPUESTA.

Según la información recopilada de la normativa NIJ 0101.06 y tal y como se ha explicado en la introducción del *apartado 1.7.*, se ha propuesto un prueba que permitiría observar el comportamiento de un fluido ante el impacto de un proyectil (véase *Figura 39*). En los siguientes epígrafes se describe un fluido propuesto con el que comenzar la experimentación, así como el elemento que lo contiene y la estructura metálica que soporta el conjunto completo.

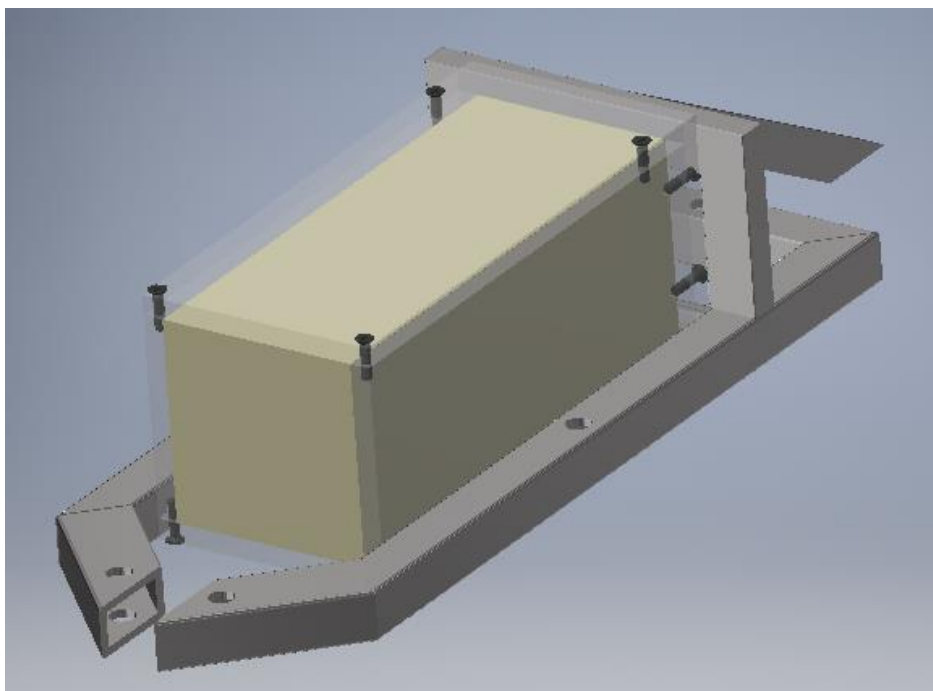


Figura 39. Modelo propuesto para realizar la experimentación de penetración de un proyectil en un fluido no newtoniano.

Antes de incidir sobre cada uno de los componentes que conforman el ensayo, es preciso mencionar que todo el conjunto se ha ideado para su uso con el calibre 9 x 19 milímetros, lo que limita en cierta medida su aplicación a otras balas que pudieran presentar mayor penetración y energía. El motivo de este desarrollo es justificado a que las investigaciones,



previamente analizadas, se basan en rangos de velocidad pequeños, algo que escapa sobremanera al que posee un proyectil balístico, con lo cual se ha priorizado caracterizar el comportamiento de un fluido no newtoniano dilatante a velocidades elevadas para un único calibre, antes que desarrollar un experimento válido para otros tipos de balas; ya que el comportamiento puede suponerse similar en primera instancia.

1.9.1. Fluido propuesto para experimentación.

Conseguir un fluido con unas características balísticas necesarias para detener el impacto de una bala es una tarea cuanto menos compleja, la cual requiere de amplios conocimientos químicos, además de material y equipo adecuados. Por esto motivo, todos los experimentos descritos con anterioridad han utilizado un mismo compuesto: una mezcla de harina de fécula de maíz (maicena) con agua, también denominado *oobleck*. Esta sustancia presenta las cualidades de un fluido no newtoniano dilatante (véase *Figura 21*), por lo que resulta interesante su aplicación en el estudio práctico propuesto debido a la alta velocidad que transmitiría el proyectil en el seno del mismo. Adicionalmente, resulta un fluido fácil de conseguir por la disponibilidad de los elementos con los que está fabricado.

Por otro lado, y como se ha destacado previamente, en las investigaciones mencionadas, fue añadido un compuesto más a la mezcla de *oobleck*. Este elemento adicional era glicerina ($C_3H_8O_3$); dicha sustancia es un alcohol que incrementa la viscosidad del conjunto, por lo que es de particular utilidad en una situación en la que grandes gradientes de velocidades van a estar presentes. Además de glicerina, también se diluyó cloruro de cesio (CsCl) para lograr una mayor uniformidad en la densidad, aunque este compuesto solo se utilizó en la investigación con el actuador lineal neumático (véase *apartado 1.8.3. Estudio con impactos generados neumáticamente.*).

1.9.2. Contenedor que alberga al fluido.

Un fluido se adapta al volumen del cuerpo que lo contiene, por lo tanto, para poder estudiarlo se ha tomado una geometría sencilla, en este caso uno con el volumen de un prisma rectangular (véase *Figura 40*). Según como se ha indicado, se ha elegido esta morfología por su similitud a otros modelos utilizados en la industria balística que permite obtener rápidas conclusiones visuales.



El fluido dentro del armazón presenta unas longitudes de 500 milímetros de largo y 200 milímetros de alto y ancho, lo que le confiere un volumen total de 0,02 metros cúbicos (m^3), o lo que es lo mismo: 20 litros (l). Esta cantidad de fluido es aproximada a la que se utiliza en otros modelos de geles balísticos para ensayos con armas de fuego, aunque es preciso destacar que estos elementos son sólidos a temperatura ambiente y están fabricados con un compuesto gelatinoso que simula la densidad del cuerpo humano.

Por un lado, en la solución propuesta se ha decidido utilizar un contenedor de metacrilato de polimetilo (PMMA) debido a que es un material transparente, resistente a los impactos y relativamente económico [38] que permitiría lograr esa rápida medición óptica, ya sea a través del ojo humano o mediante cámaras de alta velocidad o de rayos X. Dichas herramientas otorgarían la posibilidad de observar las condiciones de deformación dentro del propio fluido. Si bien es cierto que el metacrilato no es un material resistente al impacto de una bala, la longitud de 500 mm de profundidad del contenedor se ha tomado como medida de seguridad para que la fuerza del proyectil sea disipada a través del fluido y en el caso de que este no consiguiera detenerlo completamente, sí resulte capaz de no provocar un impacto dañino en la placa de PMMA.

Por otro lado, las medidas exactas del armazón se encuentran en el apartado 3. *PLANOS*.. No obstante, es menester señalar que las placas de metacrilato se han diseñado con un espesor de 20 milímetros y que la unión entre ellas se ha planteado mediante tornillos métricos ISO 7046-1 de 10 por 40 milímetros, ya que el cálculo resistente de los mismos es suficiente para mantener la unión aun si la bala impactase directamente sobre la placa posterior (*véase Anexos: 2.1.5. Uniones roscadas del armazón de la solución propuesta.*). Se ha elegido un tipo de uniones roscadas con punta plana ya que, aunque dificulta la penetración en el metacrilato, evita el nacimiento de grietas y una excesiva concentración de tensiones.

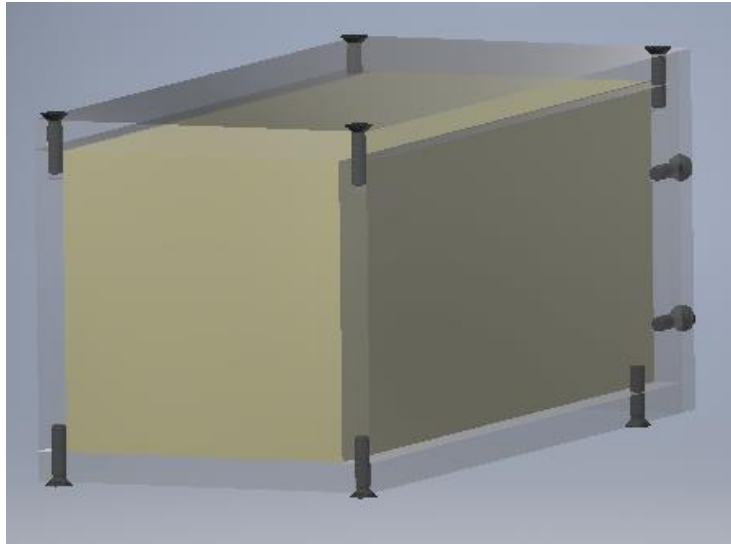


Figura 40. Armazón de metacrilato atornillado para asegurar la fijación de las distintas placas y albergar el fluido dilatante.

Por último y como es lógico, es necesario interrumpir el flujo del fluido por efecto de la gravedad en la cara donde impacta el proyectil, ya que la superficie posterior está tapada con una placa. Para lograr este propósito, es necesario utilizar un material que evite el vertido del fluido, pero cuya rigidez no contamine las mediciones y reduzca sobremedida la penetración del proyectil. Esto puede completarse mediante una lámina plástica impermeable unida al armazón mediante algún tipo de adhesivo para facilitar el desmontaje y cuyo espesor sea despreciable. Asimismo, es importante que el volumen del encofrado esté completamente relleno de fluido para evitar la formación de bolsas de aire y lograr así, que la viscosidad sea la única culpable de la parada de la bala.

1.9.3. Estructura soporte.

La alta energía que posee un proyectil en el momento del impacto es más que suficiente para desplazar el conjunto fluido - armazón, independientemente de si el primero es capaz de detener la bala, ya que la energía se transmitiría de uno al otro; por ende, es preciso detener el movimiento del contenedor para evitar un error en las mediciones y posibles daños a los instrumentos de medida, a los equipos y, especialmente, a las personas. Debido a este motivo, la carcasa debe estar anclada rígidamente para asegurarse de que no sucede esta situación; por ello, se ha diseñado una estructura metálica fabricada con acero dulce (de bajo contenido en carbono) con un valor de densidad medio de 7850 Kg/m^3 (véase *Figura 41*), ya que este parámetro varía en función de los componentes que presente la aleación. La elección de este acero es debida, principalmente, a que es un material dúctil y con un buen



grado de tenacidad; algo beneficioso para la aplicación que atañe al documento. De forma adicional, es un acero que resulta económico y que puede ser soldado con facilidad.

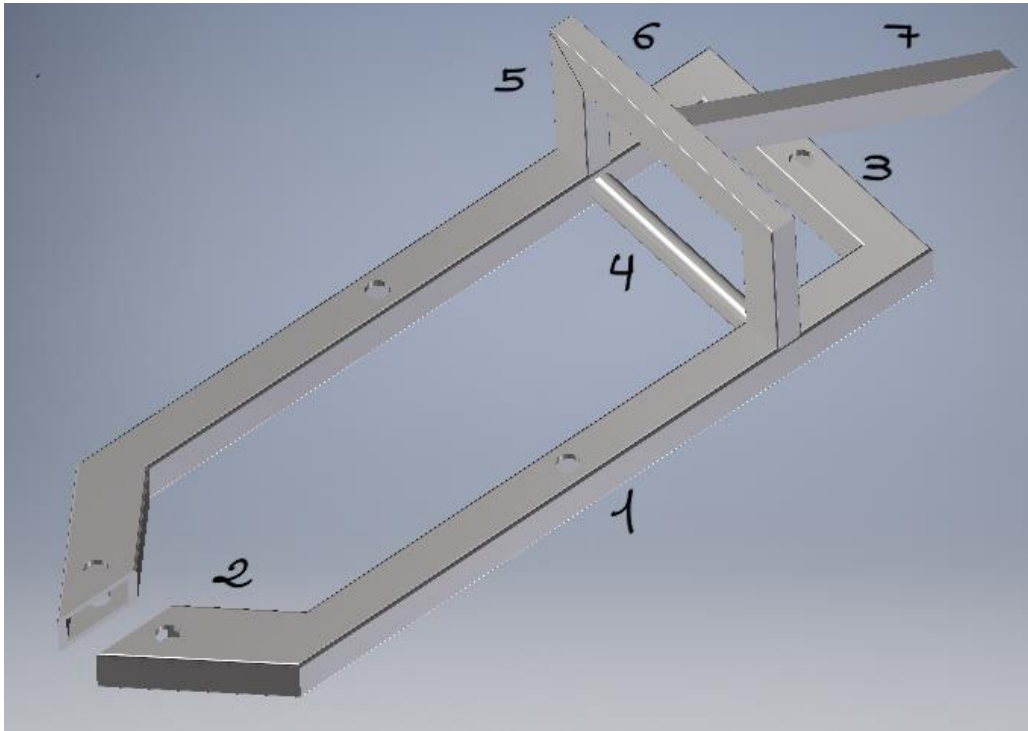


Figura 41. Estructura metálica en la se sitúa el contenedor de metacrilato. Puede apreciarse que presenta unos orificios para poder atornillarla a una bancada. Estas uniones presentan un diámetro de 25 mm.

Por otro lado, los elementos que conforman el conjunto estructural están numerados del 1 al 7 para facilitar su identificación. Cabe destacar que la numeración se ha realizado sobre un modelo concreto de barra, ya que algunas de ellas se encuentran repetidas (cuerpos 1, 2 y 5) con el fin de homogeneizarlo y cuyas dimensiones pueden ser observadas en el epígrafe: 3. PLANOS.

Elementos 1, 2 y 3.

Se trata de barras de sección cuadrada de 50 x 50 mm y 8 mm de espesor. Estos elementos componen la interfaz suelo – armazón y son la principal fuente de apoyo del conjunto entero. Por ello, su nivelación posee un carácter importante para evitar movimientos anárquicos e indeseados.

**Elemento 4.**

Consiste en un elemento cilíndrico de 30 mm de diámetro y 5 mm de espesor. Su mayor función es servir de parapeto inferior para el contenedor cuando este sea impactado por el proyectil; por lo tanto, será de los componentes que reciban mayor energía.

Elementos 5, 6 y 7.

Estos cuerpos presentan una sección rectangular de 50 x 30 mm con 4 mm de espesor. Los elementos 5 y 6 conforman la mitad superior del apoyo del armazón del fluido; mientras que el restante (el componente 7) sirve como una barra refuerzo para absorber parte de la energía a través del rozamiento con el suelo o bastidor.

El soporte en su totalidad tiene una masa de 27,6 kilogramos (Kg) y una altura máxima de unos 230 milímetros para evitar que pueda producirse un momento de vuelco si la altura fuese más elevada. Se ha pretendido que la superficie de apoyo sea lo suficientemente amplia para poder disipar la fuerza proveniente del impacto de la bala; sin embargo, se le han practicado diversos orificios de 25 mm de diámetro en los que se le puede anclar al suelo o una bancada para así lograr una mayor fijación. Las uniones roscadas están pensadas para espárragos roscados en los que incluir tuercas y arandelas que incrementen la fijación del conjunto total (véase *Anexos: 2.1.6. Uniones roscadas de la estructura de la solución propuesta.*).

Una vez finalizada la descripción de cada uno de los elementos que conforman el objeto completo de estudio, se va a proceder a describir con qué tipo de soldaduras están unidos los mismos. En primer lugar, todas las soldaduras se han diseñado para que se realicen con aluminio 6061, el cual presenta un límite elástico de 55 MPa. Todos los cordones se han calculado para que no superen este valor (véase *Anexos: 2.1.7. Uniones soldadas de la solución propuesta.*).

Elementos 1, 2 y 3.

Los tres componentes se han unido siguiendo un proceso de soldeo a tope en el que ninguna de las piezas ha sido mecanizada, por lo que se sigue el contorno de las propias barras, uniéndolas. El resultado de ese proceso son unas soldaduras de 4 mm de garganta cada una en la que ninguna de ellas entra en la categoría de soldadura peligrosa o crítica.

**Elemento 4.**

La unión de la barra cilíndrica consiste en un cordón circular que enlaza el elemento 1 con el 4. Se trata de una soldadura en ángulo en la que tampoco se requiere de ningún tipo de mecanización para poderse llevar a cabo y que presenta una longitud de garganta de 5 mm.

A diferencia del caso anterior, esta soldadura sí presenta cierto peligro de fallo por ser la que establece la detención de la mitad inferior del contenedor de fluido.

Elementos 5, 6 y 7.

El nexo entre la barra 1 y la 5 se relaciona a una soldadura en ángulo en las caras anterior y posterior de este último elemento; la longitud del plano de garganta es de: 10 mm. A su vez, el componente 5 está asociado al 6 mediante una soldadura a tope como la que presentan los elementos 1, 2 o 3.

En última instancia, los cordones que unen la barra 6 con el refuerzo 7 están diseñados para que transmitan los esfuerzos de la parte superior del parapeto (componentes 5 y 6) hasta la bancada correspondiente; esta transmisión de energía se lleva a cabo a través de una longitud de sección de garganta de: 10 mm.

Es preciso destacar que las tres soldaduras asociadas a estos elementos se corresponden con cordones críticos por su contacto directo con las cargas que existen en el problema.

1.9.4. Solución simulada.

La velocidad es un parámetro delimitante en el comportamiento de un fluido (véase 1.8.1. *Regímenes para un fluido en movimiento.*); por ello, se ha realizado una simulación mediante elementos finitos (*MSC Software Patran-Nastran*) con la que se puedan conseguir diferentes resultados, de tal manera que sean contrastables acorde con las aproximaciones que se han tomado.

Aproximaciones.

De forma introductoria y como matiz indicativo, es notable destacar que realizar cualquier tipo de simulación sobre el comportamiento de un fluido implica hacer uso de aproximaciones, ya que de no tomarlas, se debe resolver la ecuación de Navier Stokes, considerada como uno



de los problemas del milenio y para la cual solo existen resoluciones numéricas y analíticas para casos concretos.

A continuación se enuncia dicha expresión en su forma vectorial sin entrar en detalle qué es cada término, ya que se sale del objetivo del documento:

$$\frac{1}{\rho} \nabla P = \bar{F} - \frac{d\bar{V}}{dt} + \nu \nabla^2 \bar{V}$$

Ecuación 10. Ecuación de Navier Stokes en su forma vectorial para fluidos reales.

Para empezar, se ha realizado una recopilación de datos sobre el fluido utilizado en las dos experimentaciones con el objetivo de definir un material lo más acorde al comportamiento que presentó el mismo. Tal y como se ha indicado previamente, un fluido de naturaleza dilatante presenta una fase volumétrica rigidizada, cuyas características son equivalentes a las de un sólido; por este motivo, se ha decidido aproximar la mezcla simulada a un material con comportamiento sólido – elástico para un instante de tiempo en el que se produce el impacto. Los rebotes sufridos por el cuerpo impactante a través del fluido (véase *Figura 31*), suponen la principal causa para que esta aproximación haya sido tomada como válida, la cual resulta ser, además, la primera que fue aceptada para poder realizar la simulación.

Dado que se ha tomado el fluido como un sólido con naturaleza elástica, se ha considerado que dicha naturaleza tenga comportamiento lineal para poder determinar el parámetro del módulo de elasticidad (también conocido como el módulo de Young, E) de forma más sencilla. Esto corresponde con la segunda aproximación y cuya magnitud se captó de la manera explicada en el epígrafe de: *Anexos 2.1.8. Simulación de la solución propuesta.*

Por otro lado, del ensayo realizado mediante un actuador neumático, se obtuvo la conclusión, tal y como se ha indicado, que el frente de propagación de la fase rigidizada en la dirección longitudinal (la coincidente a la del impacto) es aproximadamente el doble de lo que se propaga en la dirección transversal (véase *Figura 36*). Debido a que la velocidad de cada capa viscosa está relacionada con la velocidad a la que se deforma (véase *1.7.1. Marco teórico introductorio de la mecánica de fluidos.*), se pudo establecer que el coeficiente de Poisson, ν (véase *Ecuación 15*) tome un valor de: 0,45 de manera cercana. El desarrollo matemático se encuentra en: *Anexos 2.1.8. Simulación de la solución propuesta.* y constituye la tercera aproximación.



Para finalizar, se ha generado una estructura de cinco cubos elementales independientes, apoyado uno encima del otro, de tal manera que el conjunto se aproximase al comportamiento y a la geometría troncocónica de la zona rigidizada para diferentes alturas (véase *Figura 32*); esto se corresponde con la cuarta aproximación. Es necesario señalar que este material se ha construido en el software según los parámetros propios de las investigaciones descritas con la varilla metálica y el actuador neumático, tales como la aceleración o la penetración; sin embargo, en la simulación se han establecido valores tensionales asociados a los que presenta un proyectil de 9 x 19 mm (véase *apartado 1.6.3. Cálculo tensional.*) y unas profundidades próximas a la que presenta la solución propuesta (véase *Figura 18*). Esta tesitura se ha planteado con el objetivo de analizar si los resultados obtenidos en dichas experimentaciones son extrapolables a la solución planteada, debido a que las velocidades de sendas situaciones son muy distintas entre sí. El desarrollo de la simulación se encuentra en el apartado: *2.1.8 Simulación de la solución propuesta.*

Para acabar, como quinta y última aproximación se ha tomado que los esfuerzos aplicados en el software son constantes e invariantes en el tiempo, es decir, que no se trata de impactos, los cuales sufren cambios significativos y bruscos en un periodo corto de tiempo. El motivo de este distanciamiento para con la realidad se debe a la dificultad de implementación de estos cambios tan drásticos, así como del coste de procesamiento por parte del propio ordenador; no obstante, se han mayorado las cargas para contrarrestar este efecto.

Resultados.

Antes de proceder con las conclusiones de la simulación, es preciso mostrar y analizar los resultados para comprobar que son veraces. Se va a realizar una distinción entre aquellos del problema tensional y aquellos del problema de rigidez para comprobar si ambos se correlacionan.

En primera instancia, los resultados en tensiones se indican en la imagen inferior (*Figura 42*), en dicha ilustración se observa la deformación que sufre el fluido junto con los valores de tensiones que existen en cada región. Es preciso señalar que los más grandes se relacionan con los puntos donde está ubicada la restricción de movimiento; por lo tanto, son datos falsos que no se deben considerar para la obtención de las conclusiones. No es el mismo caso, sin embargo, cuando se trata del resto de zonas del cubo, las cuales sufren unos esfuerzos de entre 22,2 y 33,4 MPa (correspondientes con las zonas en azul más oscuro).



Es importante señalar que las cargas se concentran en la zona superior (nivel 1), donde se producen los mayores esfuerzos (zona de impacto). De manera más concreta, dichas tensiones se focalizan en la parte inferior del primer cubo, es decir, donde se encuentra este con el cubo del nivel 2.

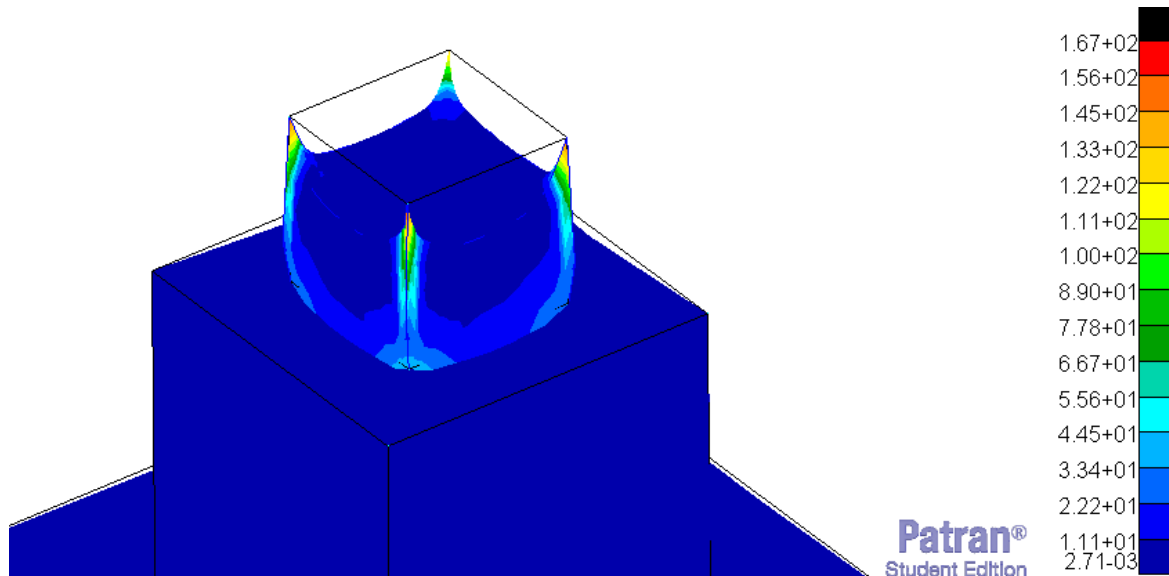


Figura 42. Resultado en tensiones de los dos primeros cubos elementales. Puede apreciarse la leyenda cromática a la derecha de la imagen.

Por otro lado, la resolución en deformaciones de cada uno de los cuerpos por parte del software se refleja posteriormente (véase *Figura 43*). Tanto en la ilustración superior como en la inferior se aprecia que los cubos están alterados; por lo tanto, es importante destacar que esa variación longitudinal está escalada para facilitar su observación.

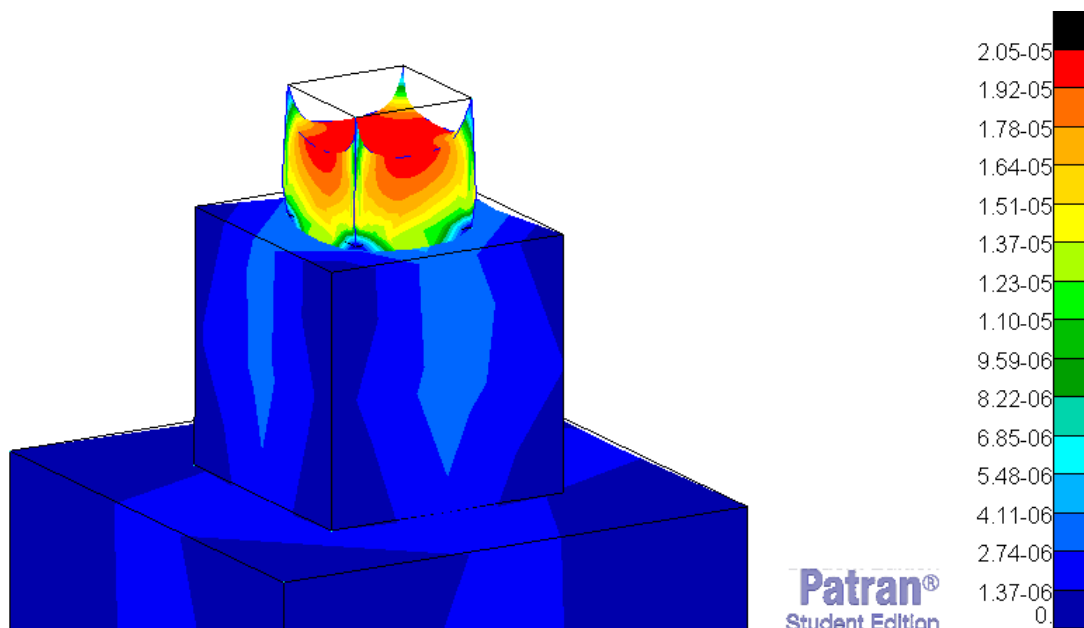


Figura 43. Resultado en deformaciones de los tres primeros niveles y las deformaciones que sufre cada uno. Apréciase que la línea negra marca el volumen original de la simulación.

El valor más alto en deformación que presenta el problema de rigidez es de: $1,92 \cdot 10^{-5}$ mm (zona roja); el cual coincide con la misma región donde se encontraban las cifras pico en tensiones, indicativo de que ambos problemas sí se corresponden y de que los resultados son correctos.

Conclusiones.

Una vez se ha comprobado que los resultados simulados son correctos, es momento de obtener las conclusiones consecuentes.

Para comenzar, posee especial importancia mencionar que la simulación se ha construido como un modelo para comprobar que el fluido es capaz de resistir los esfuerzos de un proyectil de 9 mm en el contenedor diseñado; el software da respuesta para el instante de tiempo en el que el impacto ya ha colisionado con el fluido, y este se comporta como sólido para lograr detenerlo. Los resultados en tensiones poseen importancia para demostrar las cargas de reacción que podría presentar el fluido, aunque se trate de un material aproximado. Ante los resultados en deformación, es factible afirmar que el material sea capaz de soportar los esfuerzos, ya que la variación longitudinal máxima que sufre es mínima (véase Figura 44); sin embargo, como es lógico, la única forma de asegurar verazmente el adecuado comportamiento del fluido es a través de la experimentación.

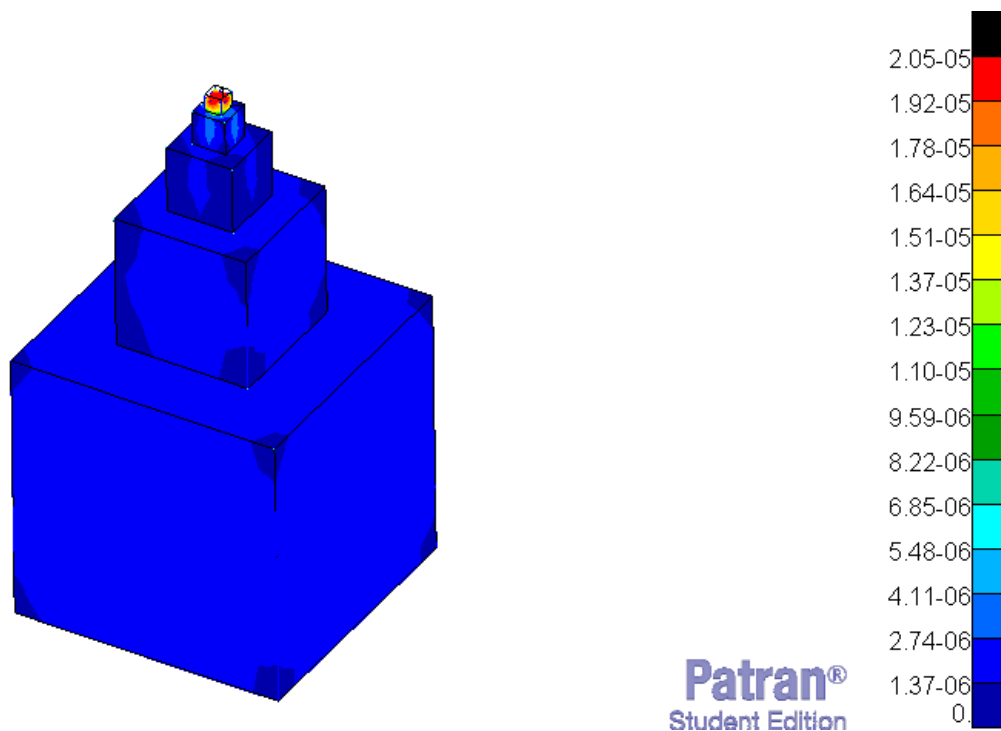


Figura 44. Imagen de los cinco cubos elementales deformados en conjunto. Puede verse que el primero de ellos es el que sufre los valores pico, mientras que el resto apenas los sufren.

Por otro lado, tal y como se indica en el apartado 1.8.4. *Conclusiones de las investigaciones y su desarrollo como protecciones antiimpactos.*, se deben tener en cuenta el efecto de otros fenómenos físicos (como la temperatura o la humedad) para poder caracterizar de manera total el comportamiento del fluido; algunos de estos fenómenos incluirían cambios para nada despreciables de no considerar el problema como ideal.

Para acabar, a lo largo del documento se ha hecho uso de una mezcla de maicena y agua como materiales para generar un fluido no newtoniano de naturaleza dilatante. El uso de este compuesto es debido a la facilidad para conseguir sus componentes, tal y como se ha visto; sin embargo, para la aplicación antiimpactos que se le pretende dar en el documento, es muy posible que exista otro fluido con mejores propiedades que el descrito.

Para concluir, el uso de fluidos no newtonianos en protecciones contra armas de fuego se ha planteado como alternativa de uso de los chalecos antibalas convencionales; no obstante, esta distinción no es sinónimo de que ambas posibilidades sean excluyentes la una con la otra, sino más bien complementarias; es decir, que el objetivo es conseguir abaratar un producto que salva vidas humanas para, en definitiva, salvar más vidas.



2. ANEXOS.

2.1. CÁLCULOS.

2.1.1. Tensión tangencial en la superficie de los diferentes proyectiles.

En el apartado 1.6. *DISIPACIÓN ENERGÉTICA DE LOS PROYECTILES*. se ha realizado una explicación detallada de cómo se han obtenido los valores energéticos, superficiales y tensionales que existen en un proyectil de 9 milímetros. Sin embargo, dado que existen multitud de calibres y geometrías distintas; en este epígrafe se han recopilado los cálculos y los resultados de los aspectos descritos para el resto de las balas que recoge la norma NIJ 0101.06. [26], [27]

Como se ha explicado anteriormente, el cálculo superficial se ha tenido que aproximar a figuras geométricas más simples debido a la falta de información. De manera adicional, existen tolerancias en la velocidad de los proyectiles ($\pm 9,1 \text{ m/s}$) y en la distancia desde la boca del cañón hasta la ubicación de la armadura ($5 \pm 1 \text{ m}$ para armas de mano y $15 \pm 1 \text{ m}$ para rifles). En todas las situaciones se han elegido tomar aquellos valores que provoquen un incremento en la tensión tangencial con el objetivo de que exista un coeficiente de seguridad dentro del error que se está cometiendo.

Requiere especial mención la aproximación realizada en la superficie de los proyectiles, ya que presenta un carácter más subjetivo debido a la diferencia de geometría de cada uno de ellos. A excepción del calibre 7,62 milímetros que se ha relacionado con un cono, el resto de balas se ha asemejado a troncos de cono por su forma extremadamente similar.

En los siguientes cálculos se puede apreciar que las armaduras de tipo IIA y II, junto con las de tipo III y IV utilizan el mismo calibre, respectivamente; pero poseen niveles energéticos diferentes. La explicación de esta distinción se halla en que para las protecciones más resistentes la velocidad de vuelo es más alta, lo que se traduce en una mayor energía cinética. Adicionalmente, los proyectiles de 7,62 milímetros presentan una diferencia másica, siendo sus valores de 9,6 (tipo III) y de 10,8 gramos (tipo IV).



Calibre de 9 mm Luger.

El calibre de 9 x 19 milímetros procede del fabricante que da nombre al proyectil; presenta una masa de 8 gramos y una velocidad de 382,1 m/s (armadura de tipo IIA), por lo que posee una energía de:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,008 \text{ Kg} \cdot 382,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 584 \text{ J}$$

$$584 \text{ J} = F \cdot 4 \text{ m} \Rightarrow F = 146 \text{ N}$$

La superficie lateral se ha calculado siguiendo lo descrito en el apartado: 1.6.2. *Cálculo de superficie.. Véase Figura 16.*

Por lo tanto, la tensión tangencial queda:

$$\tau = \frac{146 \text{ N}}{340,56 \text{ mm}^2} \cong 0,429 \text{ MPa}$$

En este caso, puede apreciarse fácilmente la diferencia tensional que provoca una variación en la velocidad del proyectil.

Calibre de 0,40 S&W.

El calibre de 0,40 pulgadas (10 x 22 mm) del fabricante Smith & Wesson presenta una masa de 11,7 gramos y una velocidad de 361,1 m/s, por lo que posee una energía de:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,0117 \text{ Kg} \cdot 361,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 762,80 \text{ J}$$

$$762,80 \text{ J} = F \cdot 4 \text{ m} \Rightarrow F = 190,7 \text{ N}$$

La superficie lateral (véase Figura 45) se ha calculado de la siguiente manera:

$$A_{cilindro} = 2\pi \cdot r \cdot h = 2\pi \cdot 5,08 \cdot 2,98 = 95,12 \text{ mm}^2$$

$$A_{tronco \text{ de cono}} = \frac{2\pi \cdot R + 2\pi \cdot r}{2} \cdot a = \frac{(2\pi \cdot 5,08 + 2\pi \cdot 2,5) \cdot 3,81}{2} = 90,73 \text{ mm}^2$$



$$A_{total} = 95,12 + 90,73 = 185,85 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, la tensión tangencial:

$$\tau = \frac{190,7 \text{ N}}{185,85 \text{ mm}^2} \cong 1,026 \text{ MPa}$$

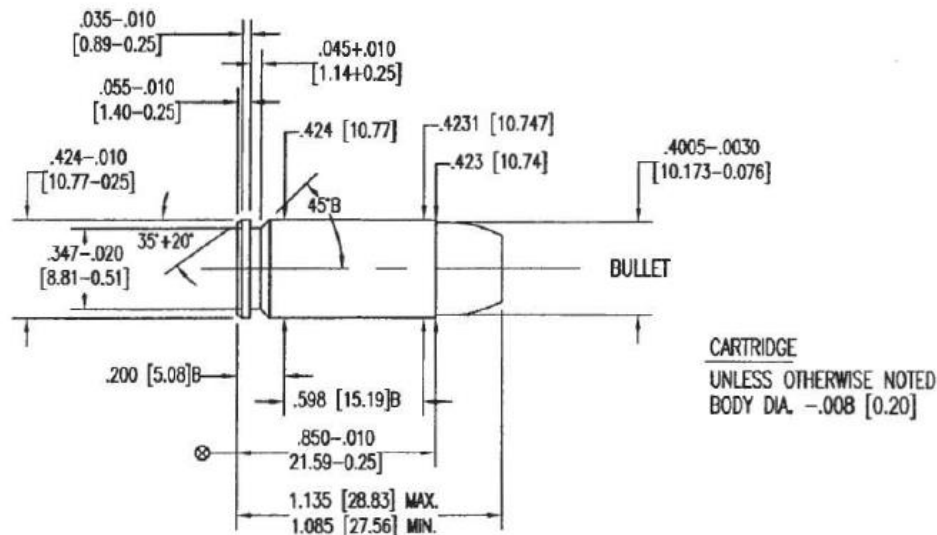


Figura 45. Relaciones longitudinales y diametrales de una bala de 0,40 pulgadas S&W. Esta imagen procede de la normativa SAAMI. [26]

Calibre de 0,357 Magnum.

El calibre de 0,357 pulgadas (9 x 33 mm) es fabricado por la compañía Smith & Wesson. Posee una masa de 10,2 gramos y una velocidad de 445,1 m/s; por ello, la energía que presenta:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,0102 \text{ Kg} \cdot 445,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1010,38 \text{ J}$$

$$1010,38 \text{ J} = F \cdot 4 \text{ m} \Rightarrow F = 252,6 \text{ N}$$



La superficie lateral se ha calculado de la siguiente manera, basándose en la *Figura 46*:

$$A_{total} = A_{tronco\ de\ cono} = \frac{2\pi \cdot R + 2\pi \cdot r}{2} \cdot a = \frac{2\pi \cdot 4,54 + 2\pi \cdot 3}{2} \cdot 2,41 = 56,98\ mm^2$$

Por lo que la tensión tangencial presenta un valor de:

$$\tau = \frac{252,6\ N}{56,98\ mm^2} \cong 4,433\ MPa$$

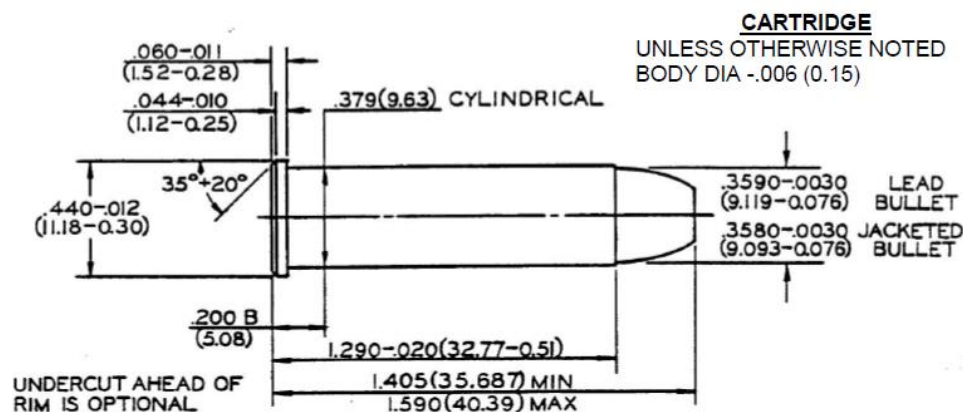


Figura 46. Geometría acotada de un proyectil de 0,357 pulgadas Magnum. Esta ilustración es propiedad de SAAMI. [26]

Calibre de 0,357 SIG.

El calibre de 0,357 pulgadas o 9 x 22 mm en unidades internacionales es fabricado por SIG – Sauer. Este modelo tiene una masa de 8,1 gramos, con una velocidad de 457,1 m/s. Su valor energético es de:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,0081\ Kg \cdot 457,1^2 \frac{m^2}{s^2} = 846,21\ J$$

$$846,21\ J = F \cdot 4\ m \Rightarrow F = 211,55\ N$$

La superficie lateral (véase *Figura 47*) se ha calculado de la siguiente manera:

$$A_{total} = A_{tronco\ de\ cono} = \frac{2\pi \cdot R + 2\pi \cdot r}{2} \cdot a = \frac{2\pi \cdot 4,54 + 2\pi \cdot 2,5}{2} \cdot 5,72 = 126,42\ mm^2$$



Por lo tanto, la tensión tangencial:

$$\tau = \frac{211,55 \text{ N}}{126,42 \text{ mm}^2} \cong 1,673 \text{ MPa}$$

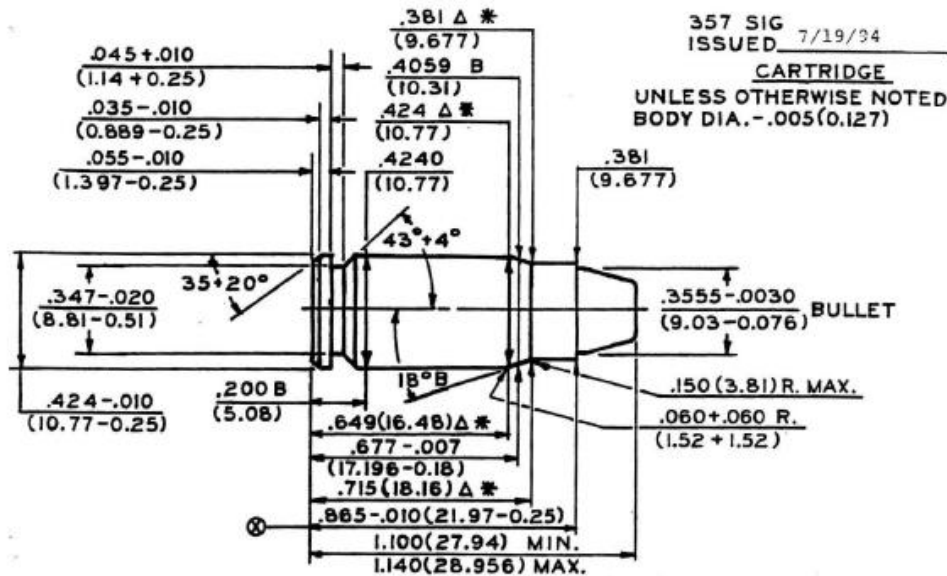


Figura 47. Vista acotada de una bala de 0,357 pulgadas de calibre. La propiedad de esta figura corresponde a SAAMI. [26]

Calibre de 0,44 Magnum.

El diámetro de esta bala es de 10,9 x 33 milímetros en su correspondencia de pulgadas. Su fabricante es Remington, el cual fabrica este proyectil con una masa de 15,6 gramos para alcanzar una velocidad de 445,1 m/s, por lo que posee una energía de:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,0156 \text{ Kg} \cdot 445,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1545,29 \text{ J}$$

$$1545,29 \text{ J} = F \cdot 4 \text{ m} \Rightarrow F = 386,32 \text{ N}$$

En la Figura 48 se aprecia las relaciones longitudinales para obtener el área:

$$A_{total} = A_{tronco \text{ de } cono} = \frac{2\pi \cdot R + 2\pi \cdot r}{2} \cdot a = \frac{2\pi \cdot 5,59 + 2\pi \cdot 5,41}{2} \cdot 5,84 = 201,82 \text{ mm}^2$$



Por lo tanto, la tensión tangencial:

$$\tau = \frac{386,32 \text{ N}}{201,82 \text{ mm}^2} \cong 1,914 \text{ MPa}$$

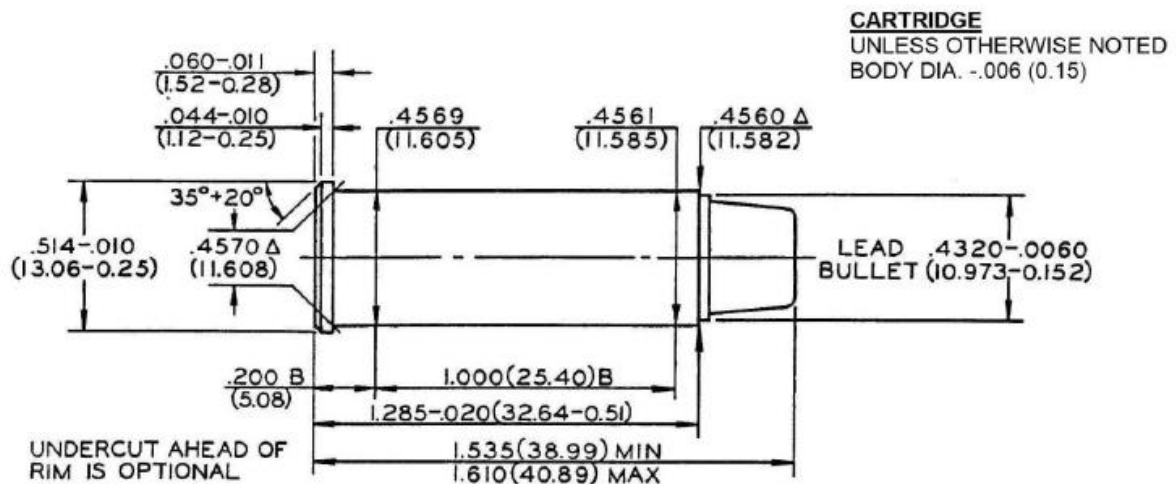


Figura 48. Ilustración con las medidas que presenta el proyectil 0,44 Magnum. Esta imagen ha sido obtenida de SAAMI. [26]

Calibre de 7,62 OTAN.

La bala de 7,62 x 51 milímetros es una de los proyectiles estándares de la OTAN. Otra denominación para ella es la de 0,308 Winchester. Como se ha indicado, existen dos variedades másicas: 9,6 y 10,8 gramos. Para cada una de ellas las velocidades correspondientes son 856,1 y 887,1 metros por segundo (m/s), respectivamente.

$$E_c(m = 9,6 \text{ g}) = \frac{1}{2} \cdot 0,0096 \text{ Kg} \cdot 856,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 3517,95 \text{ J}$$

$$3517,95 \text{ J} = F \cdot 14 \text{ m} \Rightarrow F = 251,28 \text{ N}$$

$$E_c(m = 10,8 \text{ g}) = \frac{1}{2} \cdot 0,0108 \text{ Kg} \cdot 887,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 4249,51 \text{ J}$$

$$4249,51 \text{ J} = F \cdot 14 \text{ m} \Rightarrow F = 303,54 \text{ N}$$



La superficie lateral se halló según las medidas de la *Figura 49*, cuya geometría se aproximó a un cono. Dicho valor es el mismo para ambos tipos de proyectil, independiente de su masa o velocidad.

$$A_{total} = \pi \cdot r \cdot a = \pi \cdot 3,81 \cdot 12,17 = 145,69 \text{ mm}^2$$

Por ende, los resultados de tensión tangencial para dicho calibre son:

$$\tau(m = 9,6 \text{ g}) = \frac{251,28 \text{ N}}{145,69 \text{ mm}^2} \cong 1,725 \text{ MPa}$$

$$\tau(m = 10,8 \text{ g}) = \frac{303,54 \text{ N}}{145,69 \text{ mm}^2} \cong 2,083 \text{ MPa}$$

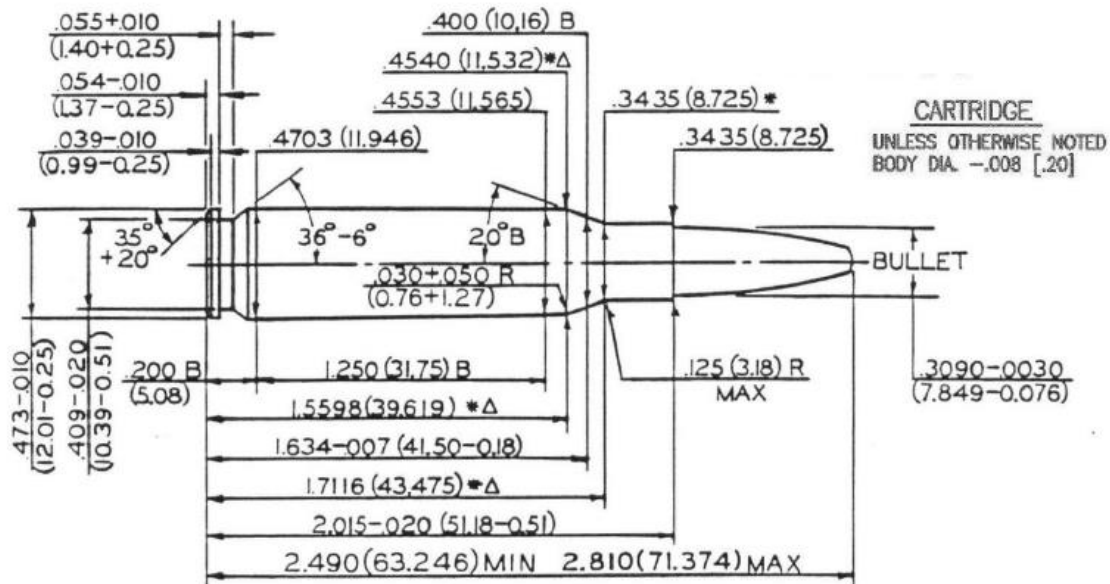


Figura 49. Medidas que presenta la bala de 7,62 x 51 milímetros de la OTAN. La imagen mostrada pertenece a SAAMI. [27]

Todos los resultados obtenidos en los cálculos previos se reflejan en el cuadro inferior (*Tabla 2*), haciendo especial referencia a los valores finales de tensión tangencial.



Tabla 2. Relación de los parámetros descritos en función del calibre de cada proyectil.

	Calibre	Energía cinética (J)	Fuerza de impacto (N)	Superficie lateral (mm^2)	Tensión tangencial (MPa)
IIA	9 mm	584	146,00	340,57	0,429
	,40 S&W	762,8	190,70	185,85	1,026
II	9 mm	662,92	165,73	340,57	0,487
	,357 Magnum	1010,38	252,60	56,98	4,433
IIIA	,357 SIG	846,21	211,55	126,42	1,673
	,44 Magnum	1545,29	386,32	201,82	1,914
III	7,62 mm	3517,95	251,28	145,69	1,725
IV	7,62 mm	4249,51	303,54	145,69	2,083

Destaca de entre todos los valores tensionales, el correspondiente para el calibre de 0,357 Magnum, el cual resulta ser más de dos veces la tensión más grande de la tabla (2,083 MPa para las protecciones de tipo IV). Dicha magnitud de fuerza por unidad de superficie es la apropiada para las defensas más resistentes que recoge la normativa utilizada; ergo, cabe pensar que la tensión cortante de 4,433 MPa sea un valor atípico. La explicación de este valor tan dispar es que la información superficial para este calibre es limitada y, por ello, presenta el área más pequeña de entre todas las balas estudiadas. Matemáticamente, al reducir el denominador en un cociente, se consigue aumentar el valor del resultado total; como consecuencia, se aprecia este aumento en el valor de la tensión tangencial para el calibre de 0,357 Magnum.

2.1.2. Valores de viscosidad ante un comportamiento lineal.

En el epígrafe anterior se han obtenido las tensiones cortantes que existen en la superficie de una bala en el momento del impacto y en función del diámetro de la misma. Gracias a esos datos, se ha determinado el valor de la viscosidad dinámica para cada uno de ellos. Se va a hacer uso de la Ley de Newton (*Ecuación 6*) con los datos presentados en la *Tabla 2* y el parámetro velocidad de la *Tabla 1*.

Calibre de 9 mm Luger.

La bala de 9 x 19 milímetros (protección de tipo IIA) presenta un valor tensional de 0,429 MPa y una velocidad de desplazamiento de $382,1 \text{ m/s}$, por lo tanto:



$$\mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{0,429 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{382,1 \text{ m/s}} = 112,27 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Calibre de 0,40 S&W.

Este proyectil presenta una velocidad de 361,1 m/s con unas tensiones a lo largo de su superficie exterior de 1,026 MPa.

$$\mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{1,026 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{361,1 \text{ m/s}} = 284,13 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Calibre de 0,357 Magnum.

Los valores necesarios para obtener la viscosidad de este diámetro son: 445,1 m/s para la velocidad de vuelo y 4,433 MPa para la tensión. Por ello:

$$\mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{4,433 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{445,1 \text{ m/s}} = 995,96 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Se ha mencionado previamente que el valor tensión cortante asociado a este calibre, resulta ser un valor atípico y por tanto, no se debe tener en cuenta a la hora de tomar conclusiones físicas porque contaminaría el resultado del análisis de todo el conjunto de datos. No obstante, se ha decidido incluirlo para mostrar el error que implica una variación en algunos de los parámetros.

Calibre de 0,357 SIG.

La bala alemana de 0,357 pulgadas de calibre lleva asociada una tensión que discurre por su superficie de 1,673 MPa; mientras que, su velocidad de vuelo es de un valor de 457,1 m/s. Con ambos:

$$\mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{1,673 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{457,1 \text{ m/s}} = 366 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

**Calibre de 0,44 Magnum.**

El proyectil Magnum de 10,9 x 33 milímetros en unidades internacionales presenta un valor tensional de 1,914 MPa y una velocidad de 445,1 m/s. Con lo cual, la viscosidad será:

$$\mu = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{1,914 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{445,1 \text{ m/s}} = 430,02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Calibre de 7,62 OTAN.

En este modelo de bala es preciso hacer recordatorio en que en él se distinguen dos valores máxicos diferentes. Por un lado, el proyectil de 9,6 gramos tiene unos valores de: 856,1 m/s y 1,725 MPa para la velocidad y la tensión, respectivamente.

$$\mu(m = 9,6 \text{ g}) = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{1,725 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{856,1 \text{ m/s}} = 201,50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Por otro lado, si la bala presenta una masa de 10,8 gramos, los valores descritos cambian a: 887,1 m/s y 2,083 MPa. Por tanto:

$$\mu(m = 10,8 \text{ g}) = \frac{\tau \cdot dy}{du} = \frac{2,083 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}}{887,1 \text{ m/s}} = 234,81 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

En el cuadro inferior (*Tabla 3*), se pueden apreciar los parámetros principales para obtener la viscosidad según cada diámetro de proyectil.

Tabla 3. Valores de velocidad, tensionales y viscosos en función de cada calibre descrito.

	Calibre	Velocidad $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	Tensión tangencial (MPa)	Viscosidad (Pa·s)
IIA	9 mm	382,1	0,429	112,27
	,40 S&W	361,1	1,026	284,13
II	9 mm	407,1	0,487	119,63
	,357 Magnum	445,1	4,433	995,96
IIIA	,357 SIG	457,1	1,673	366,00
	,44 Magnum	445,1	1,914	430,02
III	7,62 mm	856,1	1,725	201,50
IV	7,62 mm	887,1	2,083	234,81



2.1.3. Desarrollo de cálculos en la investigación con impactos generados mediante energía potencial.

Como se ha visto en la *Ecuación 8*, se puede relacionar de forma lineal la distancia recorrida por la parte del fluido con comportamiento sólido con la profundidad a la que penetra la varilla. Esa relación se debe mantener según dichas distancias y según el desplazamiento que sufre una partícula del fluido desde la altura de su superficie libre (z), la cual se considera estática hasta que es alcanzada por la rigidización en el momento del impacto.

$$z_{front} = k \cdot z_{rod}$$

$$z = z_{front} + z_{rod} \Rightarrow z_{rod} = \frac{z}{k + 1}$$

Cuando se efectúe el choque del cuerpo con el fluido, la partícula se moverá siguiendo la penetración que la varilla le impone (h_{rod} para el primer impacto; z_{rod} para el segundo, provocado por el rebote), entonces la variación de la superficie libre del fluido será:

$$\Delta z = h_{rod} - z_{rod} = h_{rod} - \frac{z}{k + 1}$$

Cuando el cuerpo metálico no penetra más se considera que $\Delta z = 0 \text{ mm}$ y por lo tanto se distinguen dos zonas (véase *Figura 50*); la pendiente de la parte izquierda de la ilustración inferior es el valor $k = 13,1 \pm 0,9$.

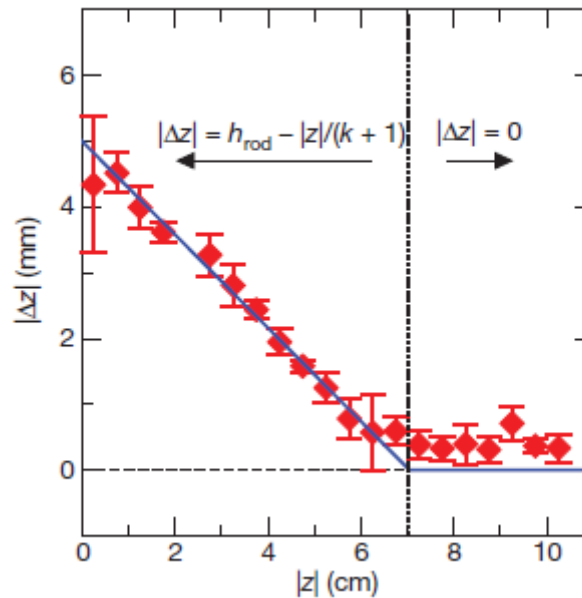


Figura 50. Gráfico que relaciona el desplazamiento de una partícula granular de la mezcla fluida en función de las fuerzas externas que generan este desplazamiento. Las figuras rojas corresponden con valores medidos y la línea azul con los obtenidos mediante modelos matemáticos. [35]

2.1.4. Concepto de masa añadida en la investigación con impactos generados mediante energía potencial.

El equilibrio de fuerzas verticales del experimento descrito con el efecto de la masa añadida supone plantear un equilibrio en el que se tenga en cuenta la masa que se mueve solidariamente con la varilla y que incrementa la del conjunto:

$$(m_{rod} + m_a) \cdot a_{rod} = -\frac{dm_a}{dt} \cdot v_{rod} + P$$

Siendo: $P = -m_{rod} \cdot g$

Los investigadores Waitukaitis y Jaeger, mediante la derivación de las fuerzas hidrodinámicas y las aceleraciones que sufrió la varilla metálica, junto con el equilibrio planteado; determinaron, de manera empírica, que ese valor presentaba una expresión como la siguiente:

$$m_a = \frac{1}{3} C \pi \rho \cdot k |z_{rod}| \cdot (r_{rod} + k |z_{rod}|)^2$$

Ecuación 11. Expresión de masa añadida relativa a la varilla de sección circular.

Donde $k = 12,5$ y $C \cong 0,37$, siendo este último parámetro el coeficiente de masa añadida.



Del desarrollo de la expresión anterior se obtuvo la imagen de la *Figura 32*, donde puede apreciarse la forma de troncocónica del volumen rigidizado del fluido frente al impacto.

2.1.5. Uniones roscadas del armazón de la solución propuesta.

A continuación se procede a realizar un análisis tensional con el objetivo de confirmar que las uniones atornilladas 7046-1 de 10 x 40 mm, fabricados en acero SAE 1020 con límite elástico de 295 MPa, son capaces de soportar los esfuerzos descritos con anterioridad. Se ha tomado el caso en el que ninguna de estas uniones sufra desperfectos.

Para realizar un cálculo lo más próximo hacia la seguridad y la certeza de que no exista fallo, se ha considerado una situación en la que la fuerza de 165,73 N (bala de 9 x 19 mm) se ejerciera directa, y perpendicularmente, sobre la placa de metacrilato, de tal manera que estos elementos asegurasen la unión con un coeficiente de seguridad a impactos de valor dos, el cual incrementa el valor de dicha fuerza, resultando en: 331,46 N.

Dado que las distancias de disparo son mínimas y la precisión de los proyectiles modernos es elevada, no se ha tenido en cuenta error en el disparo, con lo que el punto donde se sitúa la fuerza es en el medio de la placa posterior. Las uniones de dicho elemento resultan más críticas por ser las sometidas al impacto de forma directa. Asimismo, se ha contemplado que los tornillos repartan la carga de forma uniforme entre los cuatro que conforman esa unión; por lo tanto, la fuerza axial a la que está sometido cada uno de ellos es de:

$$F_{a,i} = \frac{331,46 \text{ N}}{4} = 82,87 \text{ N} \cong 90 \text{ N}$$

Se ha incrementado el valor a las decenas para tener mayor certeza de que no se va a producir un fallo.

Aunque no existen esfuerzos de carácter cortante en los tornillos de esa unión, se han añadido para combinarlos y hacer la situación más crítica. Siguiendo el criterio de Tresca:

$$F_{c,i} = \frac{1}{2} \cdot F_{a,i} \cong 45 \text{ N}$$

Con estas fuerzas, las tensiones axiales y cortantes que va a sufrir el tornillo se han calculado según el programa informático *Autodesk Inventor*, el cual otorga y tiene en cuenta valores



típicos de coeficientes de rozamiento y par de apriete, entre otros. Los resultados tensionales son, aproximadamente:

$$\sigma_{a,i} = 5,60 \text{ MPa}$$

$$\tau_{c,i} = 8,42 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, el valor máximo que pueden sufrir los elementos roscados resulta:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sqrt{(5,60)^2 + 4 \cdot (8,42)^2} = 17,75 \text{ MPa}$$

Dicha expresión se ha basado en el criterio de fallo de Tresca y dado que la tensión límite es menor que la máxima que es capaz de soportar el material a fluencia con un coeficiente de seguridad de valor dos, es posible afirmar que el diseño es válido:

$$\sigma_{admisible} = \frac{295 \text{ MPa}}{2} = 147,5 \text{ MPa}$$

Por último, es preciso hacer referencia a las variaciones de volumen que sufrirá el fluido cuando sea impactado. Estas dilataciones y contracciones impondrían cierta tensión sobre las uniones, sometiénolas a un esfuerzo alterno característico de la fatiga; sin embargo, el experimento está diseñado para realizar mediciones tras cada disparo, luego la mezcla tendrá tiempo suficiente para volver a un estado de equilibrio volumétrico sin alcanzar esfuerzos de fatiga.

2.1.6. Uniones roscadas de la estructura de la solución propuesta.

Los tornillos utilizados en el contenedor del fluido son los más críticos dada la función que desempeñan; no obstante, también es necesario determinar la unión entre el conjunto propuesto como solución y una bancada cualquiera.

En primer lugar, es importante hacer referencia a que las uniones entre grupo estructural y elemento fijo, o suelo, sirven exclusivamente como enlaces entre ambos; dichas uniones no están sometidas a esfuerzos considerablemente altos ya que la propia estructura metálica ha sido diseñada para que los elementos que reciban más carga sean las soldaduras que sirven como parapeto del contenedor del fluido. Cabe destacar que los componentes que se han



designado para realizar la fijación son espárragos roscados, los cuales permiten la incorporación de tuercas y arandelas e incrementar así la rigidez de la unión.

Dado que el software informático *Autodesk Inventor* no incluye en su librería elementos como los mencionados, se han tomado unos genéricos fabricados en acero al carbono (acero dulce) y con un diámetro de 25 mm para poder realizar los consiguientes cálculos. Se ha aceptado el mismo valor de la fuerza del apartado 2.1.5. *Uniones roscadas del armazón de la solución propuesta.*, es decir: 331,46 N; en el que ya se ha considerado el efecto del impacto.

Los elementos roscados están sometidos a dos posibles y principales fallos: por aplastamiento o por cortadura; con lo cual, serán los dos que se estudien. Se ha tomado como medida de seguridad que la fuerza mencionada se ejerza directamente sobre el propio espárrago, incrementando la fiabilidad del conjunto, ya que el módulo del esfuerzo es más grande que el que sufriría en la realidad.

$$A_{cortante} = \frac{\pi \cdot 25^2}{4} = 490,87 \text{ mm}^2$$

$$A_{aplastamiento} = 2\pi \cdot 12,5 \cdot 8 = 628,32 \text{ mm}^2$$

Las tensiones nominales que actuarían sin tener en cuenta coeficientes de apriete o la propia fricción son:

$$\tau = \frac{331,46 \text{ N}}{490,87 \text{ mm}^2} = \mathbf{0,68 \text{ MPa}}$$

$$\sigma = \frac{331,46 \text{ N}}{628,32 \text{ mm}^2} = \mathbf{0,53 \text{ MPa}}$$

Considerando que los espárragos están fabricados con el mismo acero que los tornillos del armazón, el valor resistente es: 295 MPa; por lo que no hay problema de exista fallo en este tipo de uniones pues los esfuerzos son menores que los que había en los tornillos 7046-1.

Para finalizar, se ha considerado interesante mencionar que estos cálculos son equivalentes a si la bala ejerciera el impacto directamente sobre el vástago de uno de los espárragos, la cual es una situación muy poco probable. Dichos cálculos están realizados para mayorar las tensiones que van a sufrir estos elementos con el fin de aproximarse a la certeza de que no exista fallo alguno.



2.1.7. Uniones soldadas de la solución propuesta.

El soldeo de la estructura que contiene el armazón tiene como objetivo: propiciar la unión permanente de los distintos elementos que lo conforman, otorgando rigidez en el proceso.

En este apartado, se recopilan los cálculos necesarios para confirmar, de una manera objetiva, que dichas soldaduras son capaces de resistir los esfuerzos descritos con anterioridad, es decir, la fuerza de impacto de 331,46 N. Como se ha indicado, esta no va a ser la carga exacta, pero está incrementada como medida de fiabilidad.

Para empezar, se ha considerado que todas las soldaduras se han realizado correctamente y que no sufren ningún tipo de defecto (situación ideal). Sin realizar ningún tipo de comprobación numérica, es evidente que aquellos cordones sobre los que recaen las cargas más críticas son los relativos a las barras que sirven de apoyo para el armazón cuando se produce el impacto, es decir: elementos 4, 5, 6 y 7 (*véase Figura 51*); por tanto, sobre dichas soldaduras se han realizado los pertinentes cálculos.

Es importante mencionar que la normativa que se ha seguido para categorizar la validez de las soldaduras es la NBE - EA 95, la cual presenta la siguiente expresión:

$$\sigma_{comparación} = \sqrt{\sigma^2 + 1,8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)}$$

Ecuación 12. Tensión de comparación de soldaduras.

El valor que propicia la ecuación superior (*Ecuación 12*) se debe contrastar con el límite elástico del material más débil de los que componen la soldadura, que en este caso consiste en el aluminio 6061, con un valor de: 55 MPa.

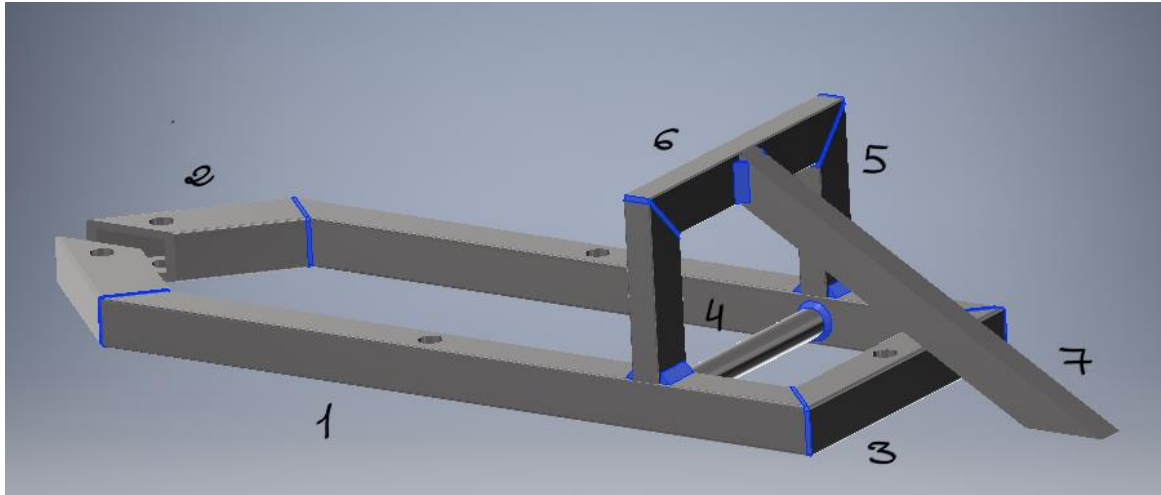


Figura 51. Estructura soporte en la que los cordones de soldadura están coloreados en azul.

Soldadura entre elementos 1 y 4.

Este cordón une el cilindro (4) con la cara interior de las barras base (1), por lo que presenta una superficie circular. La garganta tiene una longitud de 5 mm y los cálculos asociados a ella se han realizado tomándola como una soldadura de pared delgada por su pequeño espesor; de esta forma, las tensiones que se den en ella viajarán longitudinalmente por el plano de garganta. Así:

$$A = 2\pi \cdot 15 \cdot 5 = 471,24 \text{ mm}^2$$

Donde los 15 mm corresponden con el radio del tubo.

$$\tau = \frac{331,46 \text{ N}}{471,24 \text{ mm}^2} = 0,70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{comparación}} = \sqrt{0 + 1,8 \cdot (0 + 0,70^2)} = 0,94 \text{ MPa}$$

Se ha considerado que la soldadura recibe el empuje del armazón de manera uniforme; dicha fuerza deriva en una distribución de esfuerzo cortante cuyo valor ha sido tomado, aproximadamente, como el medio de la distribución real.

Soldadura entre elementos 1 y 5.

Los cordones que unen estos elementos consisten en soldaduras en ángulo, realizadas por ambos lados de la barra 5. Debido a que conforman la unión entre la base de la estructura y



la parte de esta encargada de detener el contenedor de fluido, poseen una garganta de 10 mm.

$$A = 2 \cdot 50 \cdot 10 = 1000 \text{ mm}^2$$

En este caso, el plano de garganta va a recibir esfuerzos de empuje horizontal, provocados por la transmisión del movimiento procedente del armazón de metacrilato; y de empuje vertical, los cuales se deben a un momento de vuelco desde la parte superior de la barra 6. Ambos esfuerzos son repartidos igualmente entre los dos cordones de soldadura que están presentes en el lado objeto de estudio, que será análogo al lado opuesto.

$$\sigma = \frac{331,46 \text{ N}}{1000 \text{ mm}^2} = 0,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{comparación}} = \sqrt{\left(0,33 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2\right)^2 + 1,8 \cdot \left(0 + 0,33 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2\right)^2} = 0,78 \text{ MPa}$$

Soldadura entre elementos 5 y 6.

El cordón de soldadura que conforma esta unión es el resultado de un proceso de soldeo a tope, y al igual que ocurre en la soldadura del elemento 4, recibe directamente los esfuerzos procedentes de las placas de metacrilato. Asimismo, también se va a estudiar como una soldadura de pared delgada, pues la garganta presenta un valor de 5 mm.

$$A = 2 \cdot 5 \cdot (70,71 + 30) = 1007,1 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{331,46 \text{ N}}{1007,1 \text{ mm}^2} = 0,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{comparación}} = \sqrt{0 + 1,8 \cdot (0 + 0,33^2)} = 0,44 \text{ MPa}$$

De entre las tres soldaduras estudiadas, aquella que presenta el valor más crítico es la de unión de los elementos 1 y 4. Dicho valor es menor que el límite que proporciona el aluminio 6061 con un coeficiente de seguridad de dos, tal y como indica la inecuación siguiente:



$$0,94 \text{ MPa} \leq \frac{55 \text{ MPa}}{2} = 27,5 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, puede afirmarse que las soldaduras resistirán los esfuerzos que se presentan en el problema; no obstante, es menester indicar que el soldeo es una tarea que requiere de una experiencia adecuada para lograr resultados de calidad y, como se ha mencionado anteriormente, se ha planteado desde el caso ideal en el que las mismas soldaduras no presentan defectos.

2.1.8. Simulación de la solución propuesta.

En el apartado de *Memoria: 1.9.4. Solución simulada*, se incluyen las aproximaciones tomadas para poder realizar la simulación del experimento propuesto. No obstante, en el presente epígrafe se han redactado los desarrollos matemáticos y los valores que resultaron de dichos cálculos para que, una vez introducidos en el software, fuese posible obtener los resultados que aquí se muestran, así como de su análisis crítico.

Cálculo del módulo de elasticidad (E).

Puesto que se ha asimilado que la parte rigidizada del fluido tiene un comportamiento elástico – lineal, se debe corroborar con la expresión matemática enunciada por la persona que le da nombre:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ecuación 13. Módulo de elasticidad o módulo de Young.

En primer lugar, el valor de la tensión que sufre el fluido es el transmitido por la superficie circular de la varilla en el momento del impacto y sigue una expresión como la siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A_{axial}}$$

Ecuación 14. Tensión axial, expresada como fuerza por unidad de superficie.

La fuerza que ejerce el elemento impactante es la que resulta del producto de su masa por la aceleración que sufre.



$$F = m \cdot a = 0,368 \text{ Kg} \cdot 125 \text{ m/s}^2 = 46 \text{ N}$$

$$A = \pi \cdot 9,3^2 = 271,72 \text{ mm}^2$$

El valor de la aceleración corresponde con la representación gráfica de color naranja de la *Figura 34*.

$$\sigma = \frac{46 \text{ N}}{271,72 \text{ mm}^2} = 0,17 \text{ MPa}$$

Por otro lado, el segundo término: la deformación; se obtiene como una variación longitudinal antes y después del impacto, siendo la distancia inicial de valor 20,5 cm.

$$|\varepsilon| = \frac{l_{\text{final}} - l_{\text{inicial}}}{l_{\text{inicial}}} = \left| \frac{(20,5 \text{ mm} - 0,4 \text{ mm}) - 20,5 \text{ mm}}{20,5 \text{ mm}} \right| = 0,02$$

Al igual que ocurre con la aceleración, el valor de decremento de 4 mm se asocia a una gráfica, en este caso a la *Figura 52*, donde la zona anaranjada indica dicha cantidad para el instante de 10 ms.

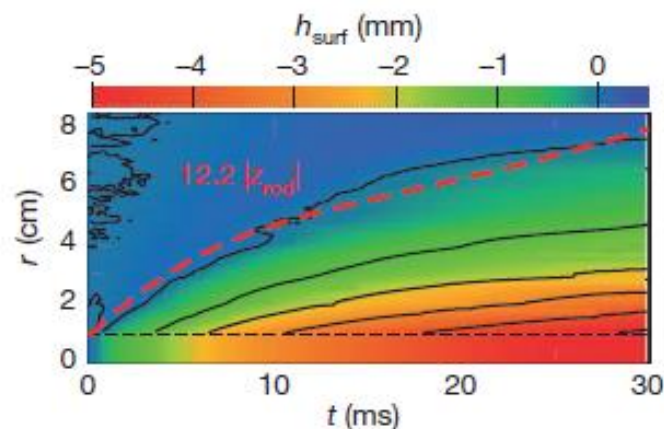


Figura 52. Variación de la superficie libre del fluido a lo largo de una distancia radial y en función del tiempo. Los valores corresponden con una aceleración de 125 m/s^2 y una velocidad de $1,18 \text{ m/s}$.

Con lo cual, el módulo de Young se obtiene de la siguiente manera:

$$E = \frac{0,17 \text{ MPa}}{0,02} = 8,5 \text{ MPa}$$



Por último, es preciso destacar que los valores para obtener este parámetro se han obtenido de la primera investigación (véase apartado 1.8.2.)

Cálculo del coeficiente de Poisson (ν).

La relación de las velocidades a las que se deforma un fluido en la dirección que sigue el impacto y en la dirección perpendicular a esta en el plano, es del doble; por ende, se puede establecer una relación como la siguiente:

$$\frac{du}{dy} \cong 2 \cdot \frac{du}{dx}$$

Siendo el eje y , el longitudinal; mientras que el x , el transversal.

El coeficiente de Poisson se define como:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Ecuación 15. Coeficiente de Poisson.

Por lo que si se relacionan los dos cocientes superiores, se alcanza:

$$\nu = \frac{du/dx}{du/dy} \cong \frac{du/dx}{2 \cdot (du/dx)} \cong 0,5$$

Apréciase que se han tomado los valores diferenciales de velocidad como una magnitud en valor absoluto, sin tener en cuenta el sentido de la velocidad de deformación. La relación descrita alcanza a ser el doble; no obstante, sufre variaciones, por lo que se escogió un valor de 0,45 con el fin de que este fuese más exacto.

Desarrollo de la simulación.

Para poder obtener resultados de la simulación, en primer lugar hay que generarla en el software informático. De manera inicial, se han creado cinco cubos elementales superpuestos uno encima de otro; esta configuración permite adoptar, aproximadamente, un volumen troncocónico como el que se presenta en la *Figura 32*, cuando el fluido se rigidiza tras el



impacto. La estructura en niveles permite observar de una forma más directa los esfuerzos y el efecto que tienen los mismos.

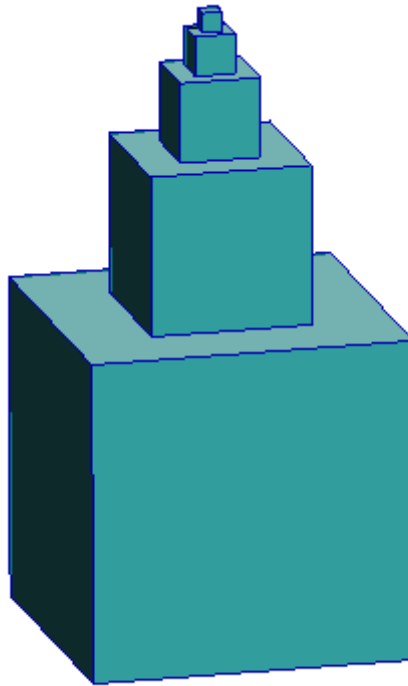


Figura 53. Estructura elemental cúbica de la simulación.

De la imagen superior (*Figura 53*) se puede observar que los cubos van incrementado su tamaño desde la parte superior (nivel 1) hasta la inferior (nivel 5); las longitudes de las aristas de los cubos se van doblando al ir ascendiendo por los niveles, resultando en las siguientes:

- Nivel 1: aristas de 10 mm.
- Nivel 2: aristas de 20 mm.
- Nivel 3: aristas de 40 mm.
- Nivel 4: aristas de 80 mm.
- Nivel 5: aristas de 160 mm.

Con lo cual, la altura total del cuerpo es de 310 mm y dado que la profundidad del contenedor del fluido es de 500 mm, significa que la simulación se ha contemplado para que la fase de comportamiento sólido no alcance los límites de dicho almacén. En esa tesitura, el problema cambiaría totalmente al cambiar a su vez los límites de contorno.



En otro aspecto, tras construir el cuerpo de la simulación, se ha procedido a establecer el mallado para discretizar al mismo, ya que un medio continuo es imposible de estudiar. Asimismo, se ha procedido a establecer las restricciones de movimiento que presenta cada uno de los cubos, las cuales impiden todos los movimientos longitudinales; para el caso de los desplazamientos rotacionales, no es necesario restringirlos debido a que no existen en este problema.

Por otro lado, también ha sido necesario disponer de las cargas que va a experimentar cada uno de los cubos. Como se ha visto en el apartado 1.6.3. *Cálculo tensional.*, la tensión tangencial que sufre la superficie de un proyectil de 9 x 19 mm es de: 0,487 MPa; no obstante, se ha utilizado el criterio de fallo estático de Tresca como aproximación para convertir las tensiones de carácter cortante en normal:

$$\sigma = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 0,487 \text{ MPa} = 0,974 \text{ MPa}$$

Este valor se relaciona con la *Ecuación 14*, en la que la superficie es la correspondiente a la superficie lateral de la bala y cuyo valor es: 340,57 mm².

$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow F = \sigma \cdot A = 0,974 \text{ MPa} \cdot 340,57 \text{ mm}^2 = 331,72 \text{ N}$$

De igual manera, los esfuerzos que sufre se han incrementado un factor multiplicativo de dos unidades para aproximar el efecto del impacto; por lo tanto: las fuerzas del primer nivel son de: 663,43 N. Considerando la superficie de una de las caras del cubo del primer nivel, la tensión que se aplica en dicha cara resulta:

$$\sigma_1 = \frac{663,43 \text{ N}}{10 \cdot 10 \text{ mm}^2} = 6,63 \text{ MPa}$$

Para el resto de niveles, los valores tensionales en sendas superficies es:

$$\sigma_2 = \frac{663,43 \text{ N}}{20 \cdot 20 \text{ mm}^2} = 1,66 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{663,43 \text{ N}}{40 \cdot 40 \text{ mm}^2} = 0,41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_4 = \frac{663,43 \text{ N}}{80 \cdot 80 \text{ mm}^2} = 0,10 \text{ MPa}$$



$$\sigma_5 = \frac{663,43 \text{ N}}{160 \cdot 160 \text{ mm}^2} = 0,026 \text{ MPa}$$

Como es lógico, en cada nivel posterior al primero la tensión se va reduciendo debido a la cantidad de esfuerzo que es absorbido por el fluido rigidizado (*Figura 54*).

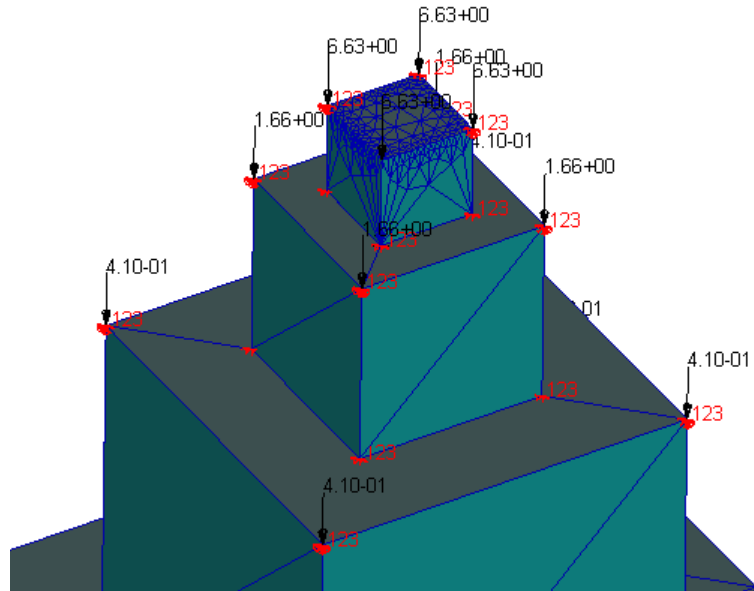
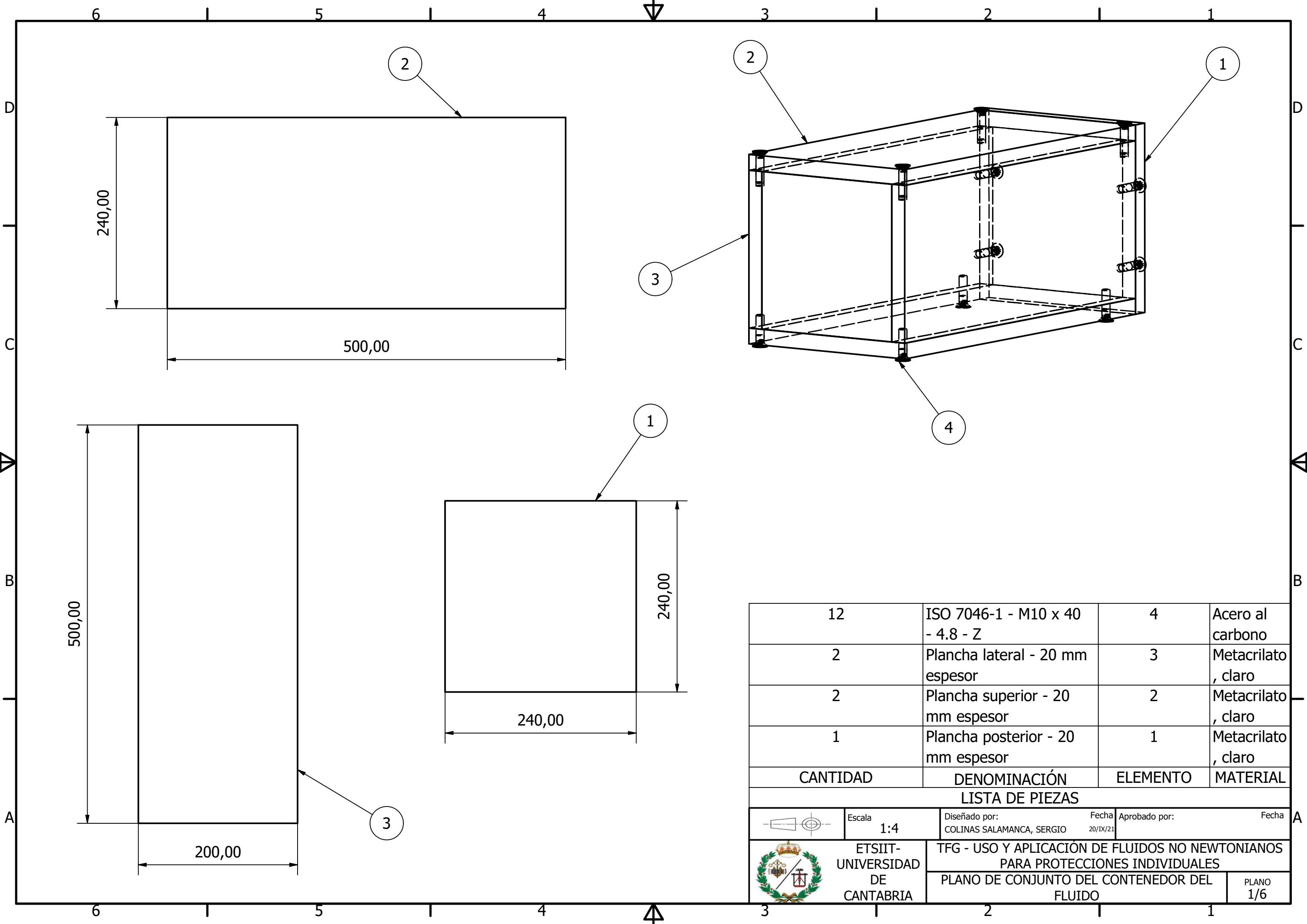


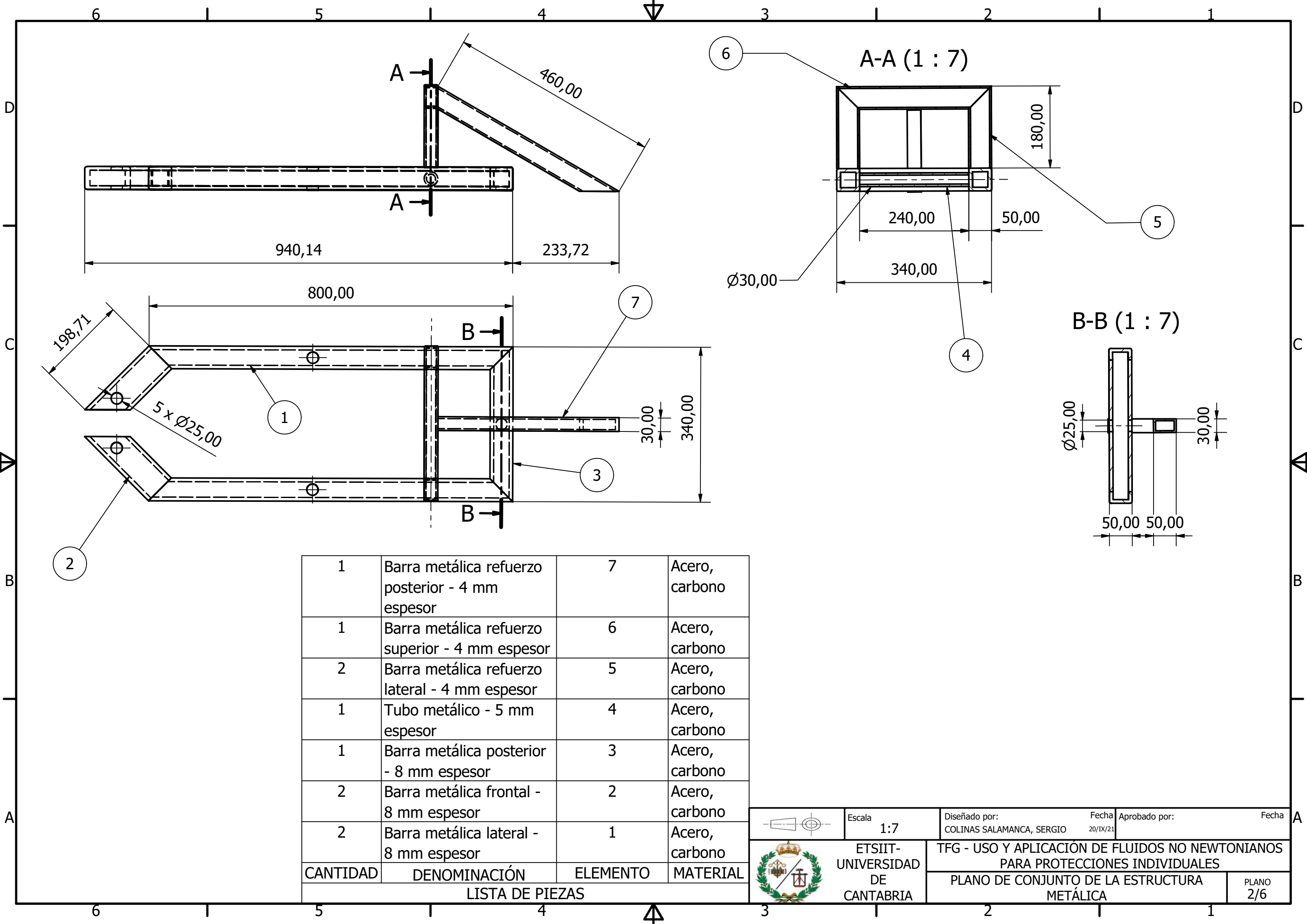
Figura 54. Cubos elementales correspondientes a los tres primeros niveles de la simulación. Apréciase los esfuerzos coloreados en negro y los grados de libertad restringidos en rojo.

En último lugar, se generó el material otorgándole los parámetros: módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν); con lo cual, así queda definido el comportamiento en deformaciones de los cinco cubos.




3. PLANOS.





1	Barra metálica refuerzo posterior - 4 mm espesor	7	Acero, carbono
1	Barra metálica refuerzo superior - 4 mm espesor	6	Acero, carbono
2	Barra metálica refuerzo lateral - 4 mm espesor	5	Acero, carbono
1	Tubo metálico - 5 mm espesor	4	Acero, carbono
1	Barra metálica posterior - 8 mm espesor	3	Acero, carbono
2	Barra metálica frontal - 8 mm espesor	2	Acero, carbono
2	Barra metálica lateral - 8 mm espesor	1	Acero, carbono
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	ELEMENTO	MATERIAL
LISTA DE PIEZAS			



ETSIIT-
UNIVERSIDAD
DE
CANTABRIA

Escala
1:7

Diseñado por:
COLINAS SALAMANCA, SERGIO

Fecha
20/IX/21

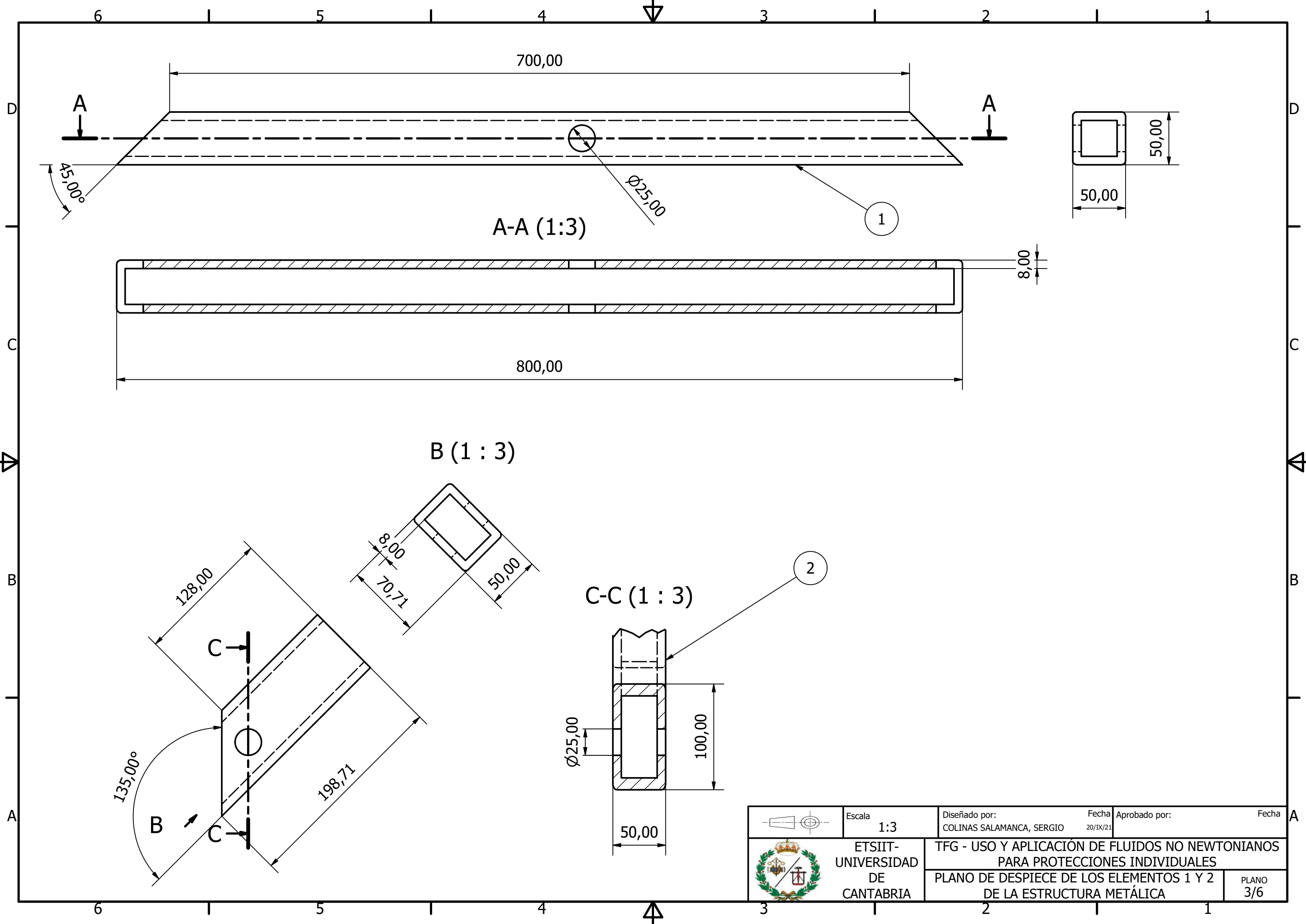
Aprobado por:


Fecha

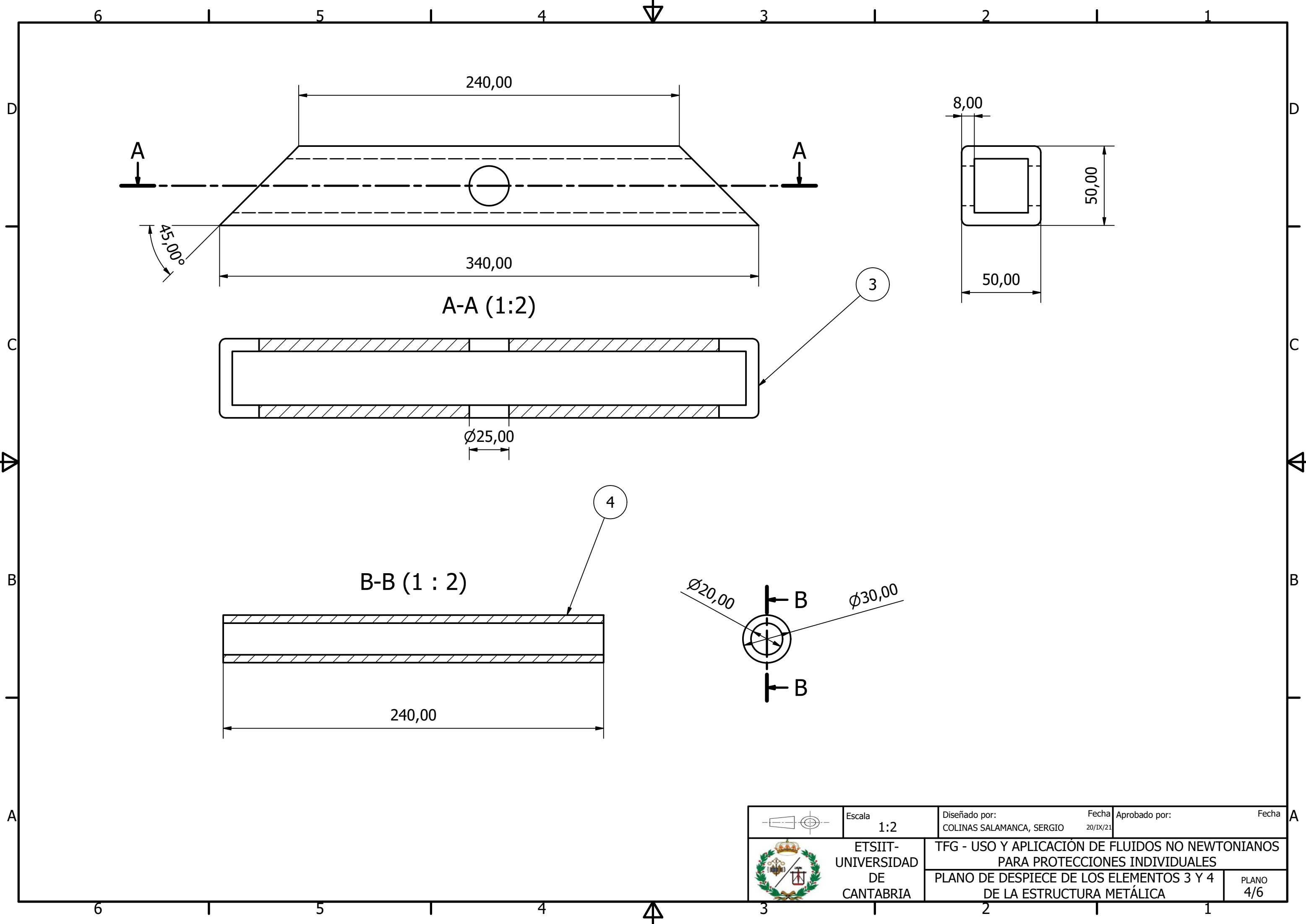
TFG - USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS
PARA PROTECCIONES INDIVIDUALES



PLANO DE CONJUNTO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

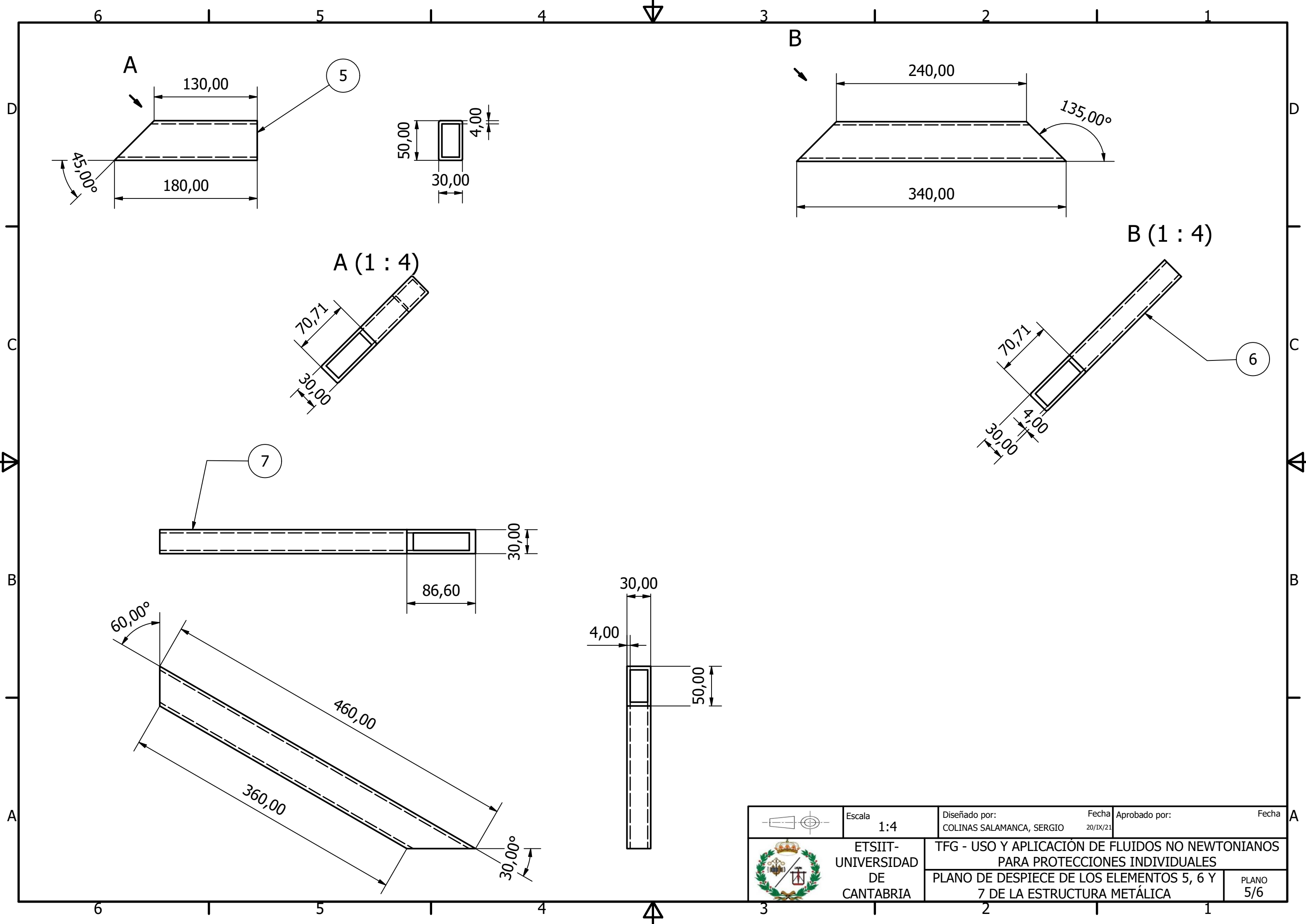
PLANO
2/6





	Escala 1:3	Diseñado por: COLINAS SALAMANCA, SERGIO		Fecha 20/IX/21	Aprobado por:	Fecha
		TFG - USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS PARA PROTECCIONES INDIVIDUALES				
PLANO DE DESPIECE DE LOS ELEMENTOS 1 Y 2 DE LA ESTRUCTURA METÁLICA						
PLANO 3/6						

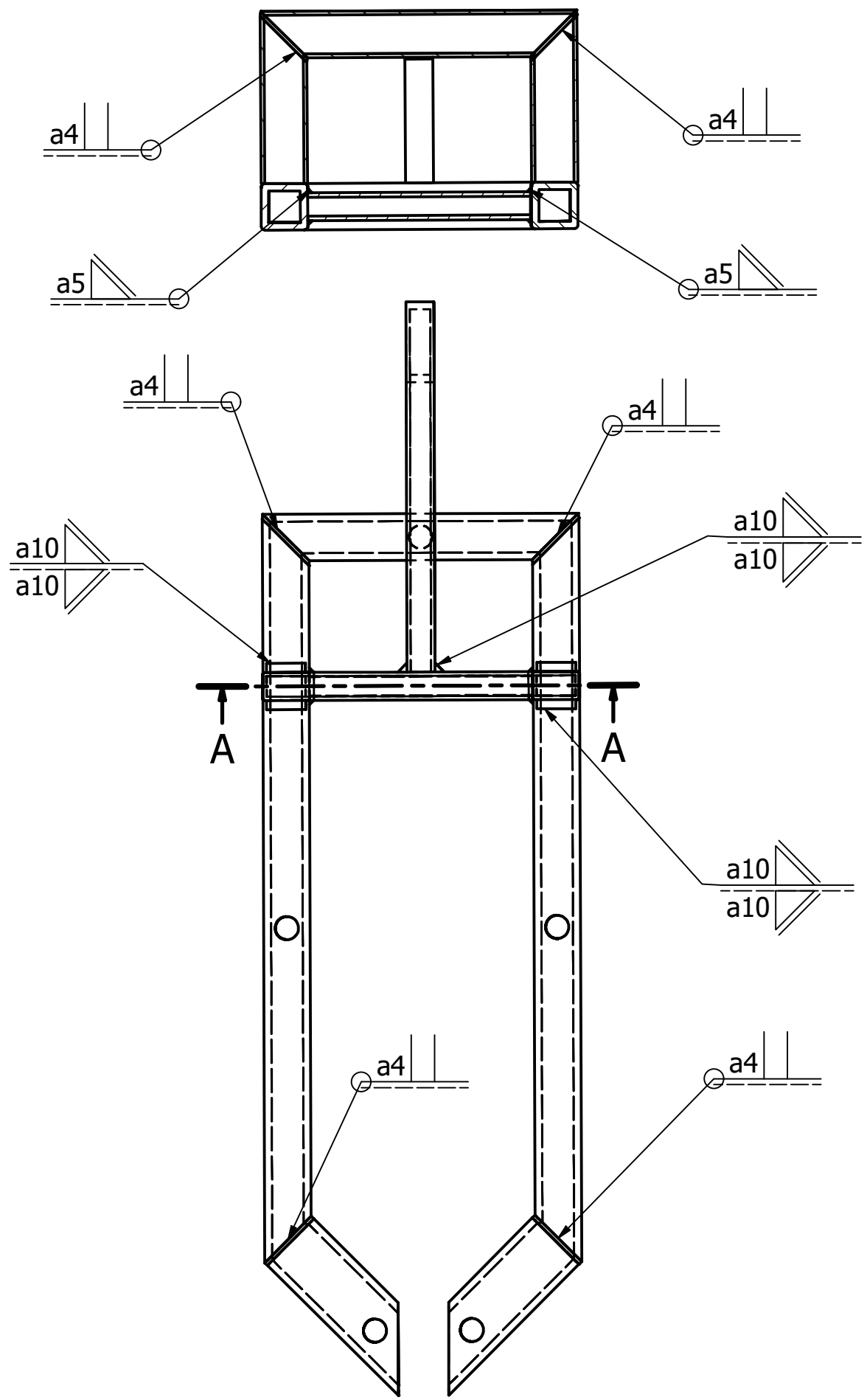


	Escala 1:2	Diseñado por: COLINAS SALAMANCA, SERGIO	Fecha 20/IX/21	Aprobado por:	Fecha
	ETSIIIT- UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	TFG - USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS PARA PROTECCIONES INDIVIDUALES			
		PLANO DE DESPIECE DE LOS ELEMENTOS 3 Y 4 DE LA ESTRUCTURA METÁLICA			PLANO 4/6

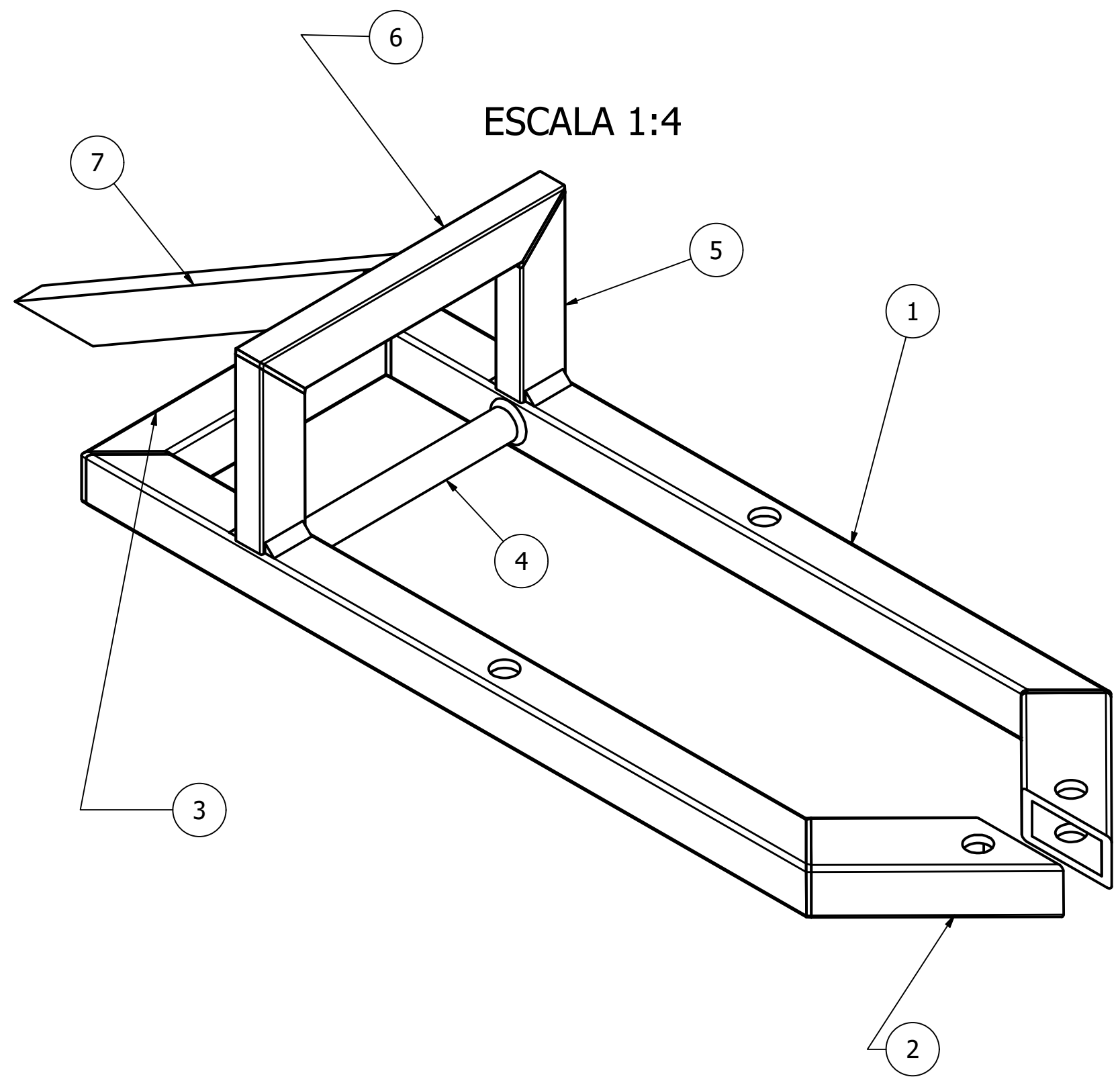



	Escala 1:4	Diseñado por: COLINAS SALAMANCA, SERGIO	Fecha 20/IX/21	Aprobado por:	Fecha
	ETSIIT- UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	TFG - USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS PARA PROTECCIONES INDIVIDUALES			
		PLANO DE DESPIECE DE LOS ELEMENTOS 5, 6 Y 7 DE LA ESTRUCTURA METÁLICA			PLANO 5/6

A-A (1:6)



ESCALA 1:4



	Escala 1:6	Diseñado por: COLINAS SALAMANCA, SERGIO		Fecha 20/IX/21	Aprobado por:	Fecha
		TFG - USO Y APLICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS PARA PROTECCIONES INDIVIDUALES				
PLANO DE SOLDADURAS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA						



4. PLIEGO DE CONDICIONES.

El experimento propuesto (véase apartado: 1.9. SOLUCIÓN PROPUESTA.) se ha diseñado para continuar la investigación sobre fluidos no newtonianos y caracterizar su comportamiento a altas velocidades tal y como se ha indicado. Es por ello que en este epígrafe se recopilan todas aquellas condiciones necesarias para poder convertir lo redactado en algo tangible, evitando así los posibles errores producidos por interpretaciones inadecuadas.

4.1. USO Y MANEJO DE ARMAS DE FUEGO.

La utilización de armas de fuego por parte de personas ajenas a cuerpos y fuerzas de seguridad de un estado está regulado por órganos de su respectivo gobierno, los cuales otorgan licencias para certificar su uso. En el caso de España, esta normativa está regulada por la Guardia Civil.

El desarrollo de la experimentación se ha pensado para realizarse con calibre de 9 x 19 milímetros, munición que se utiliza para pistolas y revólveres. Ambas armas entran dentro de la primera categoría, según Real Decreto 137/1993, de 29 de enero, BOE 55/1993; por lo tanto, para poder hacer uso de ellas es necesaria una licencia de tipo B [39].

Resulta especialmente importante el adecuado cumplimiento de esta medida para con la experimentación, ya que reduce los riesgos al mínimo al emplear a personal capacitado para tratar con las armas descritas.

4.2. FABRICACIÓN DEL FLUIDO.

Como se ha indicado, el fluido no newtoniano se conforma a partir de harina de fécula de maíz con agua y glicerina, aunque este último elemento es opcional, ya que con solo los dos primeros se conforma un fluido dilatante; por lo tanto, no se va a considerar utilizar la glicerina para este apartado.

Es imperativo que el conjunto se mezcle de manera uniforme para lograr unas propiedades homogéneas e isotrópicas. La combinación del agua y la maicena se debe realizar en estratos para asegurar una buena continuidad en las concentraciones a todas las alturas.



La mejor proporción en peso para lograr unas buenas cualidades antiimpactos consiste en que: por cada parte de agua se deba verter una y media de maicena; de esta forma, se consigue un volumen fluido del doble que el volumen inicial del agua; por ejemplo: Para el caso del armazón, el cual tiene una capacidad de 20 l de mezcla total, se necesitarían 10 l de agua y 15 Kg de harina de maíz. Sobrepasar esta relación hace que el fluido sea demasiado líquido y no adquiera suficiente rigidez ante una velocidad de deformación; por el contrario, si no se llega a alcanzar dicho ratio el conjunto es demasiado sólido, similar a una pasta polvorienta de harina con agua, perdiendo la denominación de fluido. En cualquiera de las dos combinaciones, las propiedades no son las deseadas; con lo cual, resulta de especial importancia respetar esta proporción de una parte y media de harina de maíz por cada parte de agua.

Por último, es interesante hacer destacar que en caso de añadir glicerina, esta debe ser añadida al agua en primera instancia y una vez se obtenga una primera mezcla, se añade la maicena. Realizar una combinación de los tres elementos a la vez deriva en un fluido más difícil de mezclar por su naturaleza dilatante y cuya homogeneidad no está garantizada.

4.3. FABRICACIÓN DEL ARMAZÓN.

El metacrilato es un producto que se vende en planchas de unas determinadas longitudes; luego, una vez adquirido, el siguiente paso es cortarlo según las medidas necesarias (véase *apartado 3. PLANOS*). Dicha tarea se puede lograr con herramientas como sierras de calar o sierras radiales, aunque el uso de elementos no electrónicos es igualmente eficaz para lograrlo; asimismo es algo realizable tanto por uno mismo, como por el propio vendedor.

Por otro lado, las uniones roscadas entre las distintas placas de metacrilato pueden ser realizadas mediante el uso de un taladro común.

4.4. FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Las barras metálicas, una vez compradas, deberán tener las medidas correctas (véase *apartado 3. PLANOS*), ya que cortar metal no posee la misma dificultad que cortar planchas de metacrilato. Adicionalmente se deben practicar los orificios correspondientes en las barras para su posterior anclaje al suelo; dichos agujeros pueden realizarse mediante una fresadora, un taladro industrial o una cortadora laser.



Una vez obtenidos los elementos que conforman la estructura metálica, estos deben ser soldados. El proceso de soldeo elegido es mediante arco protegido por gas y de electrodo no consumible, es decir, soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) o, también llamada GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*); el motivo de esta decisión radica en que se trata de un proceso relativamente económico en el cual se obtienen resultados de buena calidad con un buen control de la temperatura y del metal de aportación. Sin embargo y al realizarse manualmente, el soldeo escogido requiere de habilidad por parte del operario, luego este debe ser un profesional cualificado para poder llevarlo a cabo correctamente. Las variables más características para las condiciones de soldeo corresponden con un diámetro de varilla de 2,4 mm y una intensidad de corriente de 180 amperios (A).

Para acabar, las uniones roscadas que fijan el conjunto al suelo deberán establecerse con las herramientas adecuadas, cosa que dependerá de la dureza de la bancada donde se vaya a realizar la experimentación.

5. PRESUPUESTO.

La alta competitividad en el mercado global actual imposibilita la búsqueda de información sobre cuál es el coste de producir un chaleco antibalas propiamente homologado; a pesar de ello, el mismo mercado permite una gran variedad de precios a los que se puede adquirir una de estas protecciones antibalas. Tal y como se ha indicado al comienzo del documento, dicho precio está sujeto a múltiples factores como: el nivel de protección, el sexo de la persona que lo portará, con qué materiales está fabricado, etcétera; esta cualidad se refleja con claridad en la disparidad del coste de estos productos, los cuales oscilan desde un valor de 200 \$ hasta los 1300 \$ (dólares estadounidenses). Por este motivo, se ha procedido a una evaluación estimada del coste monetario que supondría desarrollar la solución propuesta [40], [41].

Es preciso mencionar que el coste de cada uno de los elementos que componen el presupuesto se ha tomado como una media aritmética de la información a la que se referencia.



5.1. COSTE DE REALIZAR LA EXPERIMENTACIÓN PLANTEADA.

Con el fin de que el presupuesto se acerque lo máximo posible a la realidad del experimento, se va a considerar que se deba obtener, aproximadamente, el mismo equipo del que se dispuso en los otros dos ensayos que se han analizado; de esta manera, si se realizase, sendos resultados serían totalmente comparables (véanse apartados: 1.8.2. y 1.8.3.).

Cabe mencionar que el coste de la glicerina no se ha tenido en cuenta Tabla 2a debido a que con agua y maicena ya se puede obtener un fluido dilatante con propiedades adecuadas antiimpactos.

5.1.1. Adquisición de materiales.

Tabla 4. Presupuesto estimado para la adquisición de los materiales.

Número	Descripción						
1	Maicena en polvo preparada para su mezcla con agua [42], [43], [44].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	Kg	-	-	-	3,8 €/Kg	15 Kg	57 €
2	Agua común con la que se realiza la mezcla la maicena [45].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	l	-	-	-	1,9 €/m ³	10 l	0,02 €
3	Planchas de metacrilato preparadas y cortadas para unirse entre ellas y conformar el contenedor donde se deposita la mezcla agua - maicena – glicerina [46].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
3.1	m ²	240 mm	240 mm	20 mm	113,21 €/m ²	1	6,57 €
3.2	m ²	200 mm	500 mm	20 mm	113,21 €/m ²	2	22,64 €
3.3	m ²	240 mm	500 mm	20 mm	113,21 €/m ²	2	27,17 €
							56,61 €



4	Tornillos 7046 - 1 de 10 mm de diámetro y 40 mm de largo con cabeza avellanada y ranura de estrella. Fabricado en acero 8.8 [47].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	-	-	-	0,75 €/ud	12 ud	9 €
5	Barras de acero S235JRH de sección cuadrada de 8 mm de espesor con los orificios de 25 mm de diámetro mecanizados [48].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
5.1	ud	800 mm	50 mm	50 mm	26,38 €/ud	2	52,76 €
5.2	ud	198,71 mm	50 mm	50 mm	24,84 €/ud	2	49,68 €
5.3	ud	340 mm	50 mm	50 mm	24,84 €/ud	1	24,84 €
							127,28 €
6	Barras de acero S235JRH de sección cuadrada de 4 mm de espesor [48].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
6.1	ud	180 mm	50 mm	30 mm	16,98 €/ud	2	33,96 €
6.2	ud	340 mm	50 mm	30 mm	16,98 €/ud	1	16,98 €
6.3	ud	460 mm	50 mm	30 mm	16,98 €/ud	1	16,98 €
							67,92 €
7	Barra de acero S235JRH de sección circular de 5 mm de espesor [49].						
	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	240 mm	30 mm ∅	-	8,16 €/ud	1	8,16 €

Conforme los datos de la *Tabla 4*, el coste de los materiales para llevar a cabo la experimentación asciende a un total de: **325,99 €**



5.1.2. Adquisición del equipo.

Tabla 5. Presupuesto estimado para la adquisición de equipo.

Número	Descripción						
8	Alquiler de cámara de alta velocidad Phantom V9.1. Uso por parte de un operador de cámara, junto con un ayudante y un técnico especializado de la compañía Phantom [50].						
	Unidades	Largo	Alto	Ancho	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	-	-	-	2500 €	1	2500 €
9	Acelerómetro DLC101 de la compañía Omega. Incluye el propio transductor (10.1), el cable: ACC - B2-10 (10.2), el suministro eléctrico y amplificador: ACC - PS1 (10.3) y el cable: ACC - CB6 (10.4) [51].						
	Unidades	Largo	Alto	Ancho	Coste unitario	Cantidad	Coste total
9.1	ud	-	-	-	420 €	1	420 €
9.2	ud	-	-	-	55 €	1	55 €
9.3	ud	-	-	-	205 €	1	205 €
9.4	ud	-	-	-	15 €	1	15 €
							695 €
10	Munición 9 x 19 mm para disparar contra la mezcla del fluido no newtoniano (agua - maicena - glicerina) [52], [53], [54].						
	Unidades	Largo	Alto	Ancho	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	-	-	-	16,50 €	50	16,50 €
11	Pistola HK USP Standard. Arma de cinto reglamentaria del cuerpo de Policía Nacional [55], [56].						
	Unidades	Largo	Alto	Ancho	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	-	-	-	652,61 €	1	652,61 €
12	Cronógrafo balístico LMBR R2H. Permite medir la velocidad y la energía de los cuerpos que atraviesan sus sensores ópticos [57], [58].						
	Unidades	Largo	Alto	Ancho	Coste unitario	Cantidad	Coste total
	ud	-	-	-	164 €	1	164 €



De acuerdo a lo que se presenta en el cuadro superior (*Tabla 5*), el desembolso económico total que supondría adquirir el equipo descrito es de: **4028,11 €**.

5.1.3. Coste total de la solución.

Conforme los datos percibidos en las tablas correspondientes a los dos epígrafes anteriores (*véanse Tabla 4 y Tabla 5*), se va a proceder a calcular el presupuesto total que supondría realizar el experimento planteado. Se ha considerado, además el coste de soldeo que supondría conformar la estructura metálica, el cual resulta en: 312 € [59].

El presupuesto total del proyecto supone un desembolso económico de: **4666,1 €**.



6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Yaneva, S., Tumbarska, A., Petkov, S. (2018). Types of bulletproof vest. Classification. *International Scientific Journal "Security & Future"*, 2(1), 43-45. Recuperado de: <https://stumejournals.com/journals/confsec/2018/1/43.full.pdf>
- [2] *Armor Materials & Technology*. Safeguardarmor. Recuperado de: <https://www.safeguardarmor.com/articles/body-armor-materials/> (11 de abril de 2021).
- [3] *Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE, HMPE)*. Polymer Database. Recuperado de: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/UHMWPE.html> (13 de abril de 2021).
- [4] *Aramid Fibers*. Polymer Database. Recuperado de: <https://polymerdatabase.com/Fibers/Aramid.html> (13 de abril de 2021).
- [5] *Polybenzoxazole Fibers*. Polymer Database. Recuperado de: <http://polymerdatabase.com/Fibers/PBO.html> (13 de abril de 2021).
- [6] Sánchez Gálvez, V., Sánchez Paradela, M.L., (octubre de 2012). *Materiales para la Defensa*. Fundetel. ISBN: 978-84-7402-391-6
- [7] M.V. Silva, D. Stainer, H.A. Al-Qureshi, O.R.K. Montedo, D. Hotza. (9 de enero de 2014). Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing. *Journal of Ceramics*, vol. 2014, article ID 618154. Recuperado de: <https://www.hindawi.com/journals/jceram/2014/618154/>
- [8] Scott Burton. How Do You Make a Bulletproof Vest? *Body Armor News*. Recuperado de: <https://www.bodyarmornews.com/how-to-make-a-bullet-proof-vest/> (16 de abril de 2021)
- [9] Made in China [Figura]. Recuperado de: <https://premier.en.made-in-china.com/product/XBQxAKNEJWrl/China-Bulletproof-Vest-Military-Kevlar-Aramid-Fabric.html>
- [10] Engarde [Figura]. Recuperado de: <https://www.engardebodyarmor.com/engarde-introduces-ultra-light-body-armor/>



- [11] El chaleco antibalas ITEPOL vs Brenneke: la mayor protección del mercado. *Uniformidad y Suministros de Protección* [Figura]. Recuperado de: <https://uspsuministros.com/chaleco-antibalas-itepol/>
- [12] Austral Tactical [Figura]. Recuperado de: <https://australtactical.cl/producto/chaleco-porta-placas-tactec-5-11/>
- [13] National Institute of Justice. (julio de 2008). Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06. Recuperado de: <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/223054.pdf>
- [14] *The History of Body Armor*. Safeguardarmor. Recuperado de: <https://www.safeguardarmor.com/articles/the-history-of-body-armor/> (7 de mayo de 2021).
- [15] Academia Play. (5 de junio de 2018). *20 datos curiosos sobre la falange griega*. Academia Play! [Figura]. Recuperado de: <https://academiaplay.es/20-datos-curiosos-falange-griega/> (7 de mayo de 2021).
- [16] Etsy [Figura]. Recuperado de: <https://www.etsy.com/mx/listing/647469708/20-from-100usd-medieval-knight-gothic> (7 de mayo de 2021).
- [17] Marta Poza Yagüe. (18 de mayo de 2010). *La batalla de Ceriñola*. Instituto Cervantes. Centro Virtual Cervantes. Recuperado de: https://cvc.cervantes.es/el_rinconete/anteriores/mayo_10/18052010_02.htm (7 de mayo de 2021).
- [18] Souto Alves. *Los tercios españoles en el siglo XVI*. Historia General [Figura]. Recuperado de: <https://historiageneral.com/2009/10/29/los-tercios-espanoles-en-el-siglo-xvi/> (7 de mayo de 2021).
- [19] Aitziber Lopez. (7 de marzo de 2017). *Stephanie Kwolek, la química que ha salvado miles de vidas*. Mujeres con ciencia. Recuperado de: <https://mujeresconciencia.com/2017/03/07/stephanie-kwolek-la-quimica-ha-salvado-miles-vidas/> (7 de mayo de 2021).



- [20] J. Murali Krishnan, Abhijit P. Deshpande, P.B. Sunil Kumar (2010). Non-Newtonian Fluids: An Introduction. En Rajendra P. Chhabra (Ed.), *Rheology of Complex Fluids* (pp. 3-34). Indian Institute of Technology Madras; Chennai, India. ISBN: 978-1-4419-6494-6
- [21] *Aceites lubricantes para motores de combustión interna* (24 de octubre de 2018). INEN Normalización [Figura]. Recuperado de: <http://inennormalizacion.blogspot.com/2018/10/aceites-lubricantes-para-motores-de.html> (7 de mayo de 2021).
- [22] *La erupción volcánica en Islandia se amplía con nueva expulsión de lava*. (5 de abril de 2021). RFI [Figura]. Recuperado de: <https://www.rfi.fr/es/mundo/20210405-la-erupci%C3%B3n-volc%C3%A1nica-en-islandia-se-amplia-con-nueva-expulsi%C3%B3n-de-lava> (7 de mayo de 2021).
- [23] *Primer badén inteligente de España*. (7 de noviembre de 2014). Revista Tráfico y Seguridad Vial - DGT. Recuperado de: <https://revista.dgt.es/es/noticias/nacional/2014/11NOVIEMBRE/1107baden-inteligente.shtml#> (7 de mayo de 2021).
- [24] *Bullets: Sizes, Calibers, and Types [Guide + Videos]*. (julio de 2020). Pew Pew Tactical. Recuperado de: <https://www.pewpewtactical.com/bullet-sizes-calibers-and-types/#:~:text=,22LR,in%20terms%20of%20units%20sold.&text=It%20has%20a%20bullet%20weight,i%20both%20pistols%20and%20rifles> (30 de abril de 2021).
- [25] *Cartuchos del Sur* [Figura]. Recuperado de: <http://egdelsur.es/productos/municion-arma-corta/> (1 de mayo de 2021).
- [26] American National Standard. (2015). Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Pistol and Revolver Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers. SAAMI Z299.3. Recuperado de: <https://saami.org/technical-information/cartridge-chamber-drawings/>
- [27] American National Standard. (2015). Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Rifle Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers. SAAMI Z299.4. Recuperado de: <https://saami.org/technical-information/cartridge-chamber-drawings/>



- [28] Claudio Mataix. (abril de 1986). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Ediciones de Castilo, S. A. ISBN: 84-219-0175-3
- [29] Sheldon D. (23 de marzo de 2015). *World War 1 Body Armor: 1914-1918*. Flashback. Recuperado de: <https://flashbak.com/world-war-1-body-armor-1914-1918-32670/> (8 de mayo de 2021)
- [30] *Acero al Manganeso*. URSSA. Aceros especiales. Recuperado de: <https://www.acerosurssa.es/es/content/44-acero-al-manganeso> (8 de mayo de 2021).
- [31] Christopher E. Howard (Veritas, Vol. 16, No. 1, 2020). *"This vest may save your life!" U.S. Army Body Armor from WWII to Present*. Office of the command historian. [Figura]. Recuperado de: https://arsof-history.org/articles/19oct_body_armor_page_1.html (8 de mayo de 2021).
- [32] Michael Crites. (31 de enero de 2021). *Hollow point vs FMJ: A comparison*. American Firearms. [Figura]. Recuperado de: <https://www.americanfirearms.org/hollow-point-vs-fmj-comparison/> (8 de mayo de 2021).
- [33] Robert Goldberg. (28 de septiembre de 2020). *The basics of ballistic gelatin testing*. Norma Academy. Recuperado de: <https://www.norma-ammunition.com/en-gb/norma-academy/dedicated-components/ballistics/the-basics-of-ballistic-gelatin-testing> (8 de mayo de 2021).
- [34] Baumgarten, Aaron S. and Ken Kamrin. (19 de julio de 2018). *A general fluid–sediment mixture model and constitutive theory validated in many flow regimes*. Journal of Fluid Mechanics (febrero de 2019): 721-64, Vol 861.
- [35] Scott R. Waitukaitis and Heinrich M. Jaeger. (12 de julio de 2012). *Impact – activated solidification of dense suspensions via dynamic jamming fronts*. Nature (2012), Vol 487, 205 – 209.
- [36] Ivo R. Peters and Heinrich M. Jaeger. *Quasi – 2D dynamic jamming in cornstarch suspensions: visualization and force measurements*. The Royal Society of Chemistry (2010).



- [37] *Fluido electrónico 3M™ Fluorinert™ FC – 3283*. 3M Science. Applied to Life. Recuperado de: https://www.3m.com.es/3M/es_ES/p/d/b00043108/ (9 de mayo de 2021).
- [38] *Metacrilato: Propiedades del metacrilato*. Metacrilatos. Recuperado de: <https://metacrilatos.com/propiedades-del-metacrilato/#:~:text=Dureza%3A%20Aunque%20frente%20a%20otros,1%2C18%20g%2Fcm3.https://metacrilatos.com/propiedades-del-metacrilato/#:~:text=Dureza%3A%20Aunque%20frente%20a%20otros,1%2C18%20g%2Fcm3.> (22 de junio de 2021).
- [39] Real Decreto 137 (1993). *Reglamento de Armas, BOE-A-1993-6202 del 29 de enero de 1993, Páginas 7016 a 7051*. Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1993-6202>
- [40] *Body Armor & Riot Gear*. Security Pro USA. [Presupuesto]. Recuperado de: https://www.securityprousa.com/collections/body-armor-riot-gear/Bulletproof-Vests?_pf&sort=price-ascending (10 de agosto de 2021).
- [41] *Bulletproof Vests*. Bulletproof Zone. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://bulletproofzone.com/collections/bulletproof-vests> (10 de agosto de 2021).
- [42] *Maizena harina de maíz, paquete 400 g*. Dia. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.dia.es/compra-online/despensa/pastas-harinas-y-masas/harinas-y-levaduras/p/132110> (11 de agosto de 2021).
- [43] *Harina fina de maíz, 400 g*. Alcampo. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.alcampo.es/compra-online/alimentacion/azucar-harina-masas-y-pan/harinas-y-masas/harinas/maizena-harina-fina-de-maiz-400-g/p/625360> (11 de agosto de 2021).
- [44] *Harina de maíz fina Maizena sin gluten 400 g*. Carrefour. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.carrefour.es/supermercado/harina-de-maiz-fina-maizena-sin-gluten-400-g-maizena/R-791104630/p> (11 de agosto de 2021).
- [45] Manuel Ferro. (23 de abril de 2021). *Precio de agua en España: Toda la información*. Tarifasdeagua. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://tarifasdeagua.es/info/precio> (11 de agosto de 2021).



- [46] Servicio de venta de Carretillas Mayor. (19 de mayo de 2021). [Presupuesto].
- [47] Screwerk. Tienda en línea. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://de.screwerk.com/es/shop/detail/stm/STM330800400B.html> (11 de agosto de 2021).
- [48] *Tubo cuadrado de acero. Calidad: S235JRH*. Materiales 4 me. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://es.materials4me.com/metales/acero/tubo-cuadrado/tubo-cuadrado-de-acero-calidad-s235jrh?number=X1HC39050050040> (12 de agosto de 2021).
- [49] *Tubo de acero inoxidable*. PreciosFactory.com. [Presupuesto]. Recuperado de: https://preciosfactory.com/tienda/accesorios-y-herrajes-mobiliario-inoxidable/999630129-tubo-acero-inoxidable.html#/2937-diametro-30_mm_espesor_2_mm (12 de agosto de 2021).
- [50] Ashley Pascual. (8 de octubre de 2020). *How much does a phantom camera cost?*. Beverley Boy Productions. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://beverlyboy.com/how-much-does-it-cost/how-much-does-a-phantom-camera-cost/> (12 de agosto de 2021).
- [51] *Dynamic load cells for high – frequency tension/compression force measurements*. Omega. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.omega.nl/Pressure/pdf/DLC101.pdf> (12 de agosto de 2021).
- [52] *Fiocchi 9 mm SP 100 gr*. Ravell. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.ravell.es/cartuchos-pistola/181-fiocchi-9-mm-sp-100-gr.html> (12 de agosto de 2021).
- [53] *Cartuchos cal. 9mm PB Punta de Plomo*. Shoke, Defensa y Seguridad. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.tiendashoke.es/municion-armas/cartucho-9mm-pb> (12 de agosto de 2021).
- [54] *Cartuchos CBC Magtech 9 mm Luger 124 grains FMJ*. Lejarazu Sport. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://es.lejarazusport.com/cartuchos-cbc-magtech-fmj-9mm-luger-124-grains.html> (12 de agosto de 2021).
- [55] *Pistola HK USP COMPACT 9 mm PB*. Shoke, Defensa y Seguridad. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.tiendashoke.es/pistolas-de-fuego/pistola-hk-uspcompact> (12 de agosto de 2021).



- [56] *Pistola HK USP STANDARD*. BlackRecon. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.blackrecon.com/pistola-hk-usp-standard.html> (12 de agosto de 2021).
- [57] *AHG Cronógrafo Balístico*. Chano Shooting. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://chanoshooting.com/ahg-cronografo-balistico-2/> (13 de agosto de 2021).
- [58] *LMBR Cronógrafo R2H*. Armasayala.com. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://armasayala.com/es/cronografos-balisticos-lmbr-el-original/602-lmbr-cronografo-balistico-r2h-no-necesita-varillas-ni-luz.html> (13 de agosto de 2021).
- [59] *Soldadores: Precio y Presupuesto*. Habitissimo. [Presupuesto]. Recuperado de: <https://www.habitissimo.es/presupuestos/soldadores> (13 de agosto de 2021).